

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**ESTUDIO DEL DESCARRILAMIENTO  
DEL VAGÓN DE TREN DE MERCANCÍAS  
CON BOGIES Y25**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

***DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA***

AUTOR: D. ALBERTO GARCÍA SERRANO

TUTORAS: Dra. Dña. MARÍA JESÚS LÓPEZ BOADA

Dra. Dña. BEATRIZ LÓPEZ BOADA

# Agradecimientos

Quiero agradecer la labor de mis profesores a lo largo de estos años y en particular la disposición y el apoyo de mis tutoras Beatriz López Boada y, especialmente, de María Jesús López Boada, que me ha dedicado parte de su tiempo para resolver problemas y hacerme recomendaciones. Gracias a ellas ha sido posible la realización de este proyecto.

Especial agradecimiento a mis padres por darme la oportunidad de realizar una carrera tan bonita como la de Ingeniería, que no solo me ha forjado como Ingeniero Técnico, sino que me ha brindado la oportunidad de abrir más mi mente y alcanzar nuevos horizontes; y además me ha permitido conocer un poco más el funcionamiento de las técnicas científicas que aportan progreso a la sociedad y contribuyen a su desarrollo.

He de dar las gracias a todos los compañeros y amigos que he tenido a lo largo de la carrera, por hacer que el día a día haya sido mucho más alegre y ameno, pero en mayor medida, por haber creado amistades que perdurarán por largo tiempo.

# ÍNDICE

<b>1. Introducción del proyecto</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos del proyecto	2
1.2. Estructura del proyecto	2
<b>2. Estado del arte</b>	<b>3</b>
2.1. La vía	3
2.1.1. Ancho de vía	3
2.1.2. El carril	4
2.1.3. Traviesas	5
2.1.4. Balasto	5
2.2. El bogie	6
2.2.1. Clasificaciones de los bogies	7
2.2.2. Funciones de los bogies	8
2.2.3. Composición de los bogies	8
2.3. Contacto rueda-carril	18
2.3.1. Teoría de Hertz. Problema normal	21
2.3.2. Teoría de Kalker. Problema tangencial	22
2.4. Teoría del descarrilamiento	25
<b>3. El bogie Y25</b>	<b>32</b>
3.1. Introducción	32
3.2. Datos técnicos del bogie Y25	35
3.3. Amortiguación de fricción Lenoir	35
3.4. Adaptación del bogie Y25 al programa Adams/Rail	37
3.4.1. Modelado de los elementos en Adams/Rail	38
3.4.1.1. Modelo detallado de la caja de grasa en Adams/Rail.	38
3.4.1.2. Suspensión	40
3.4.1.3. Modelado de la rueda	41
3.4.2. Construcción y ensamblado	42
3.4.2.1. Template Builder	42
3.4.2.2. Estándar Interface	43
<b>4. Resultados de simulación</b>	<b>44</b>
4.1. Criterios de variación de parámetros	44
4.2. Resultados obtenidos	47
<b>5. Conclusiones y futuros trabajos</b>	<b>153</b>
5.1. Conclusiones	153
5.2. Trabajos futuros	158
<b>6. Referencias</b>	<b>159</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1: Ancho de vía
- Figura 2.2: Carril
- Figura 2.3: Vehículo articulado ante una desnivelación
- Figura 2.4: Bogie de vehículo de pasajeros
- Figura 2.5: Tipos de enganche entre vagones
- Figura 2.6: Bastidor de un bogie
- Figura 2.7: Eje calado
- Figura 2.8: Perfil de llanta
- Figura 2.9: Caja de grasa
- Figura 2.10: Ballesta
- Figura 2.11: Muelle helicoidal
- Figura 2.12: Muelles helicoidales de fleje
- Figura 2.13: Barras de torsión
- Figura 2.14: Muelle Belleville
- Figura 2.15: Muelle de anillos.
- Figura 2.16: Muelle de goma para solicitaciones combinadas verticales y laterales
- Figura 2.17: Apoyo vertical con elementos elásticos independientes
- Figura 2.18: Apoyo vertical por elementos elásticos conjugados y ecualización de fuerzas entre dos ejes con suspensión de ballesta
- Figura 2.19: Disposición de un bogie de cuatro ruedas con “semiecuación” de la carga y apoyo vertical por balancín entre cajas
- Figura 2.20: Caja de grasa para guiado por resbaladera
- Figura 2.21: guiado longitudinal por cilindros concéntricos
- Figura 2.22: Arrastre por medio de bieletas
- Figura 2.23: Suspensión primaria de brazo articulado longitudinal
- Figura 2.24: Arrastre por bieleta única
- Figura 2.25: Soporte vertical por pivote central cilíndrico o esférico
- Figura 2.26: Apoyo vertical en dos puntos
- Figura 2.27: Arrastre longitudinal por pivote
- Figura 2.28: Dos cuerpos en contacto de rodadura
- Figura 2.29: Deslizamiento y fuerzas de rozamiento
- Figura 2.30: Radios de curvatura rueda-carril
- Figura 2.31: Posición extrema oblicua, límite de la marcha libre
- Figura 2.32: Giro del bogie hasta la posición de la extrema simétrica, límite de la marcha forzada
- Figura 2.33: Inscripción de la rodadura en curvas posición encajada
- Figura 2.34: Movimiento de serpenteo o lazo
- Figura 2.35: Detalle de los acuerdos de la pestaña y riel
- Figura 2.36: El radio del acuerdo de la pestaña es suficientemente amplio
- Figura 2.37: Detalle en tres dimensiones de cómo es medido el ángulo y
- Figura 3.1: Bogie Y25
- Figura 3.2: Alzado Y25
- Figura 3.3: Planta Y25
- Figura 3.4: Soporte central de superficie esférica
- Figura 3.5: Caja de grasa y suspensión primaria
- Figura 3.6: Representación de la función continua de la fuerza de rozamiento
- Figura 3.7: Representación de las caras de fricción
- Figura 3.8: Componentes de la fuerza de fricción en el plano ZY
- Figura 3.9: Modelo detallado de la caja de grasa



Figura 3.10: Bogie Y25 en Adams/Rail  
 Figura 3.11: Constantes de rigidez de la suspensión primaria  
 Figura 3.12: Pivote central  
 Figura 3.13: Rigidez elástica del pivote  
 Figura 3.14: Comportamiento Fuerza vs Desplazamiento pivote central  
 Figura 3.15: Comportamiento Fuerza vs Desplazamiento pivote lateral  
 Figura 3.16: Perfil "P8" de la rueda  
 Figura 3.17: modos de trabajo  
 Figura 3.17: \_Y25.tpl  
 Figura 3.19: \_Y25wagon\_laden.tpl  
 Figura 3.20: Ensamblado del conjunto caja-bogieY25  
 Figura 4.1: Rigidez torsional de la caja  
 Figura 4.2: Propiedades del cojinete de torsión  
 Figura 4.3: *Property file* característico del resorte  
 Figura 4.4: Propiedades de la caja  
 Figura 4.5: Ventana de modificación de los resortes de suspensión  
 Figura 4.6: Propiedades del resorte  
 Figura 4.7: Ventana de análisis  
 Figura 4.8: *Track Property File*  
 Figura 4.9: Localización de ruedas y sentido de la marcha  
 Figura 4.10: Ejemplo del tren circulando por una curva  
 Figura 4.11: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.12: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.13: Coef. Desc.  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.14: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.15: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.16: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.17: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=300000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$   
 Figura 4.18: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=300000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$   
 Figura 4.19: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=300000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$   
 Figura 4.20: Descarrilamiento en el análisis 3  
 Figura 4.21: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.22: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.23: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.24: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.25: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.26: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.27: Vuelco del vagón  
 Figura 4.28: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.29: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.30: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.31: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.32: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.33: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.34: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.35: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.36: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$   
 Figura 4.37: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.38: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.39: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$   
 Figura 4.40: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$   
 Figura 4.41: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

Figura 4.93: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

Figura 4.94: Fuerza lateral r=400m; k=100000N/m; m=20000kg; v=35m/s  
 Figura 4.95: Fuerza vertical r=400m; k=100000N/m; m=20000kg; v=35m/s  
 Figura 4.96: Coef. Desc r=400m; k=100000N/m; m=20000kg; v=35m/s  
 Figura 4.97: Fuerza lateral r=400m; k=100000N/m; m=20000kg; v=40m/s  
 Figura 4.98: Fuerza vertical r=400m; k=100000N/m; m=20000kg; v=40m/s  
 Figura 4.99: Coef. Desc r=400m; k=100000N/m; m=20000kg; v=40m/s  
 Figura 4.100: Fuerza lateral r=400m; k=100000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
 Figura 4.101: Fuerza vertical r=400m; k=100000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
 Figura 4.102: Coef. Desc r=400m; k=100000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
 Figura 4.103: Fuerza lateral r=400m; k=100000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
 Figura 4.104: Fuerza vertical r=400m; k=100000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
 Figura 4.105: Coef. Desc r=400m; k=100000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
 Figura 4.106: Fuerza lateral r=400m; k=100000N/m; m=40000kg; v=40m/s  
 Figura 4.107: Fuerza vertical r=400m; k=100000N/m; m=40000kg; v=40m/s  
 Figura 4.108: Coef. Desc r=400m; k=100000N/m; m=40000kg; v=40m/s  
 Figura 4.109: Fuerza lateral r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
 Figura 4.110: Fuerza vertical r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
 Figura 4.111: Coef. Desc r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
 Figura 4.112: Fuerza lateral r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
 Figura 4.113: Fuerza vertical r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
 Figura 4.114: Coef. Desc r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
 Figura 4.115: Fuerza lateral r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
 Figura 4.116: Fuerza vertical r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
 Figura 4.117: Coef. Desc r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
 Figura 4.118: Fuerza lateral r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
 Figura 4.119: Fuerza vertical r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
 Figura 4.120: Coef. Desc r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
 Figura 4.121: Fuerza lateral r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=50m/s  
 Figura 4.122: Fuerza vertical r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=50m/s  
 Figura 4.123: Coef. Desc r=400m; k=500000N/m; m=4000kg; v=50m/s  
 Figura 4.124: Fuerza lateral r=400m; k=500000N/m; m=20000kg; v=30m/s  
 Figura 4.125: Fuerza vertical r=400m; k=500000N/m; m=20000kg; v=30m/s  
 Figura 4.126: Coef. Desc r=400m; k=500000N/m; m=20000kg; v=30m/s  
 Figura 4.127: Fuerza lateral r=400m; k=500000N/m; m=20000kg; v=35m/s  
 Figura 4.128: Fuerza vertical r=400m; k=500000N/m; m=20000kg; v=35m/s  
 Figura 4.129: Coef. Desc r=400m; k=500000N/m; m=20000kg; v=35m/s  
 Figura 4.130: Fuerza lateral r=400m; k=500000N/m; m=20000kg; v=40m/s  
 Figura 4.131: Fuerza vertical r=400m; k=500000N/m; m=20000kg; v=40m/s  
 Figura 4.132: Coef. Desc r=400m; k=500000N/m; m=20000kg; v=40m/s  
 Figura 4.133: Fuerza lateral r=400m; k=500000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
 Figura 4.134: Fuerza vertical r=400m; k=500000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
 Figura 4.135: Coef. Desc r=400m; k=500000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
 Figura 4.136: Fuerza lateral r=400m; k=500000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
 Figura 4.137: Fuerza vertical r=400m; k=500000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
 Figura 4.138: Coef. Desc r=400m; k=500000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
 Figura 4.139: Fuerza lateral r=400m; k=500000N/m; m=40000kg; v=40m/s  
 Figura 4.140: Fuerza vertical r=400m; k=500000N/m; m=40000kg; v=40m/s  
 Figura 4.141: Coef. Desc r=400m; k=500000N/m; m=40000kg; v=40m/s  
 Figura 4.142: Fuerza lateral r=400m; k=900000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
 Figura 4.143: Fuerza vertical r=400m; k=900000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
 Figura 4.144: Coef. Desc r=400m; k=900000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
 Figura 4.145: Fuerza lateral r=400m; k=900000N/m; m=4000kg; v=35m/s

[illegible]

Figura 4.198: Coef. Desc r=500m; k=100000N/m; m=20000kg; v=40m/s  
Figura 4.199: Fuerza lateral r=500m; k=100000N/m; m=20000kg; v=45m/s  
Figura 4.200: Fuerza vertical r=500m; k=100000N/m; m=20000kg; v=45m/s  
Figura 4.201: Coef. Desc r=500m; k=100000N/m; m=20000kg; v=45m/s  
Figura 4.202: Fuerza lateral r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
Figura 4.203: Fuerza vertical r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
Figura 4.204: Coef. Desc r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
Figura 4.205: Fuerza lateral r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
Figura 4.206: Fuerza vertical r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
Figura 4.207: Coef. Desc r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
Figura 4.208: Fuerza lateral r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=40m/s  
Figura 4.209: Fuerza vertical r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=40m/s  
Figura 4.210: Coef. Desc r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=40m/s  
Figura 4.211: Fuerza lateral r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=45m/s  
Figura 4.212: Fuerza vertical r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=45m/s  
Figura 4.213: Coef. Desc r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=45m/s  
Figura 4.214: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
Figura 4.215: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
Figura 4.216: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
Figura 4.217: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
Figura 4.218: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
Figura 4.219: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
Figura 4.220: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
Figura 4.221: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
Figura 4.222: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
Figura 4.223: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
Figura 4.224: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
Figura 4.225: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
Figura 4.226: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=50m/s  
Figura 4.227: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=50m/s  
Figura 4.228: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=50m/s  
Figura 4.229: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=20000kg; v=30m/s  
Figura 4.230: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=20000kg; v=30m/s  
Figura 4.231: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=20000kg; v=30m/s  
Figura 4.232: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=20000kg; v=35m/s  
Figura 4.233: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=20000kg; v=35m/s  
Figura 4.234: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=20000kg; v=35m/s  
Figura 4.235: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=20000kg; v=40m/s  
Figura 4.236: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=20000kg; v=40m/s  
Figura 4.237: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=20000kg; v=40m/s  
Figura 4.238: Fuerza lateral r=500m; k=200000N/m; m=20000kg; v=45m/s  
Figura 4.239: Fuerza vertical r=500m; k=200000N/m; m=20000kg; v=45m/s  
Figura 4.240: Coef. Desc r=500m; k=200000N/m; m=20000kg; v=45m/s  
Figura 4.241: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
Figura 4.242: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
Figura 4.243: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=30m/s  
Figura 4.244: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
Figura 4.245: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
Figura 4.246: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=35m/s  
Figura 4.247: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=40m/s  
Figura 4.248: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=40m/s  
Figura 4.249: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=40m/s

Figura 4.250: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
Figura 4.251: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
Figura 4.252: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
Figura 4.253: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
Figura 4.254: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
Figura 4.255: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
Figura 4.256: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
Figura 4.257: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
Figura 4.258: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
Figura 4.259: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
Figura 4.260: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
Figura 4.261: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
Figura 4.262: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
Figura 4.263: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
Figura 4.264: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
Figura 4.265: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=50m/s  
Figura 4.266: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=50m/s  
Figura 4.267: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=50m/s  
Figura 4.268: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=30m/s  
Figura 4.269: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=30m/s  
Figura 4.270: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=30m/s  
Figura 4.271: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=35m/s  
Figura 4.272: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=35m/s  
Figura 4.273: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=35m/s  
Figura 4.274: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=40m/s  
Figura 4.275: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=40m/s  
Figura 4.276: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=40m/s  
Figura 4.277: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=45m/s  
Figura 4.278: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=45m/s  
Figura 4.279: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=2000kg; v=45m/s  
Figura 4.280: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
Figura 4.281: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
Figura 4.282: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=30m/s  
Figura 4.283: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
Figura 4.284: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
Figura 4.285: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=35m/s  
Figura 4.286: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
Figura 4.287: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
Figura 4.288: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=40m/s  
Figura 4.289: Fuerza lateral r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
Figura 4.290: Fuerza vertical r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=45m/s  
Figura 4.291: Coef. Desc r=500m; k=900000N/m; m=4000kg; v=45m/s

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Anchos de vía

Tabla 2.2: Valores de  $m$  y  $n$

Tabla 2.3: Valores de coeficientes de deslizamiento y giro

Tabla 3.1: Características físicas del bogie Y25

Tabla 4.1: Características del análisis 1

Tabla 4.1: Características del análisis 1

Tabla 4.2: Características del análisis 2

Tabla 4.3: Características del análisis 3

Tabla 4.4: Características del análisis 4

Tabla 4.5: Características del análisis 5

Tabla 4.6: Características del análisis 6

Tabla 4.7: Características del análisis 7

Tabla 4.8: Características del análisis 8

Tabla 4.9: Características del análisis 9

Tabla 4.10: Características del análisis 10

Tabla 4.11: Características del análisis 11

Tabla 4.12: Características del análisis 12

Tabla 4.13: Características del análisis 13

Tabla 4.14: Características del análisis 14

Tabla 4.15: Características del análisis 15

Tabla 4.16: Características del análisis 16

Tabla 4.17: Características del análisis 17

Tabla 4.18: Características del análisis 18

Tabla 4.19: Características del análisis 19

Tabla 4.20: Características del análisis 20

Tabla 4.21: Características del análisis 21

Tabla 4.22: Características del análisis 22

Tabla 4.23: Características del análisis 23

Tabla 4.24: Características del análisis 24

Tabla 4.25: Características del análisis 25

Tabla 4.26: Características del análisis 26

Tabla 4.27: Características del análisis 27

Tabla 4.28: Características del análisis 28

Tabla 4.29: Características del análisis 29

Tabla 4.30: Características del análisis 30

Tabla 4.31: Características del análisis 31

Tabla 4.32: Características del análisis 32

Tabla 4.33: Características del análisis 33

Tabla 4.34: Características del análisis 34

Tabla 4.35: Características del análisis 35

Tabla 4.36: Características del análisis 36

Tabla 4.37: Características del análisis 37

Tabla 4.38: Características del análisis 38

Tabla 4.39: Características del análisis 39

Tabla 4.40: Características del análisis 40

Tabla 4.42: Características del análisis	42
Tabla 4.43: Características del análisis	43
Tabla 4.41: Características del análisis	41
Tabla 4.44: Características del análisis	44
Tabla 4.45: Características del análisis	45
Tabla 4.46: Características del análisis	46
Tabla 4.47: Características del análisis	47
Tabla 4.48: Características del análisis	48
Tabla 4.49: Características del análisis	49
Tabla 4.50: Características del análisis	50
Tabla 4.51: Características del análisis	51
Tabla 4.52: Características del análisis	52
Tabla 4.53: Características del análisis	53
Tabla 4.54: Características del análisis	54
Tabla 4.55: Características del análisis	55
Tabla 4.56: Características del análisis	56
Tabla 4.57: Características del análisis	57
Tabla 4.58: Características del análisis	58
Tabla 4.59: Características del análisis	59
Tabla 4.60: Características del análisis	60
Tabla 4.61: Características del análisis	61
Tabla 4.62: Características del análisis	62
Tabla 4.63: Características del análisis	63
Tabla 4.64: Características del análisis	64
Tabla 4.65: Características del análisis	65
Tabla 4.66: Características del análisis	66
Tabla 4.67: Características del análisis	67
Tabla 4.68: Características del análisis	68
Tabla 4.69: Características del análisis	69
Tabla 4.70: Características del análisis	70
Tabla 4.71: Características del análisis	71
Tabla 4.72: Características del análisis	72
Tabla 4.73: Características del análisis	73
Tabla 4.74: Características del análisis	74
Tabla 4.75: Características del análisis	75
Tabla 4.76: Características del análisis	76
Tabla 4.77: Características del análisis	77
Tabla 4.78: Características del análisis	78
Tabla 4.79: Características del análisis	79
Tabla 4.80: Características del análisis	80
Tabla 4.81: Características del análisis	81
Tabla 4.82: Características del análisis	82
Tabla 4.83: Características del análisis	83
Tabla 4.84: Características del análisis	84
Tabla 4.85: Características del análisis	85
Tabla 4.86: Características del análisis	86
Tabla 4.87: Características del análisis	87



Tabla 4.88: Características del análisis 88

Tabla 4.89: Características del análisis 89

Tabla 4.90: Características del análisis 90

Tabla 4.91: Características del análisis 91

Tabla 4.92: Características del análisis 92

Tabla 4.93: Características del análisis 93

Tabla 4.94: Valores máximos de coeficiente de descarrilamiento al entrar en la curva

Tabla 4.95: Valores máximos de coeficiente de descarrilamiento en el transcurso de la curva

Tabla 4.96: Variación del coeficiente de descarrilamiento en el inicio de la curva

Tabla 4.97: Variación del coeficiente de descarrilamiento en el transcurso de la curva

# 1. Introducción

---

La vía está constituida por un conjunto de elementos con módulos de elasticidad y coeficientes de amortiguación que transmiten las cargas dinámicas de las ruedas a la plataforma y soporta esfuerzos verticales, transversales y longitudinales; si bien estos últimos tienen una pequeña influencia en las solicitaciones de la superestructura, los dos primeros son determinantes para el dimensionamiento de la misma. A través de la experiencia de muchos años, se ha conseguido adaptar la forma y dimensiones de los elementos de la superestructura a los esfuerzos que han de soportar, pero la evolución del ferrocarril hacia velocidades cada vez mayores hace necesario analizar con mayor profundidad, mediante procedimientos empíricos y cálculos teóricos, la influencia de las distintas solicitaciones. Para ello, es necesario introducir algunas simplificaciones ya que los fenómenos que intervienen en la interacción vía-vehículo no son, en general, elásticos, y por otra parte existen unos movimientos que complican el problema. Estos movimientos son el cabeceo y oscilación alrededor de un eje transversal, el movimiento de balanceo alrededor de un eje longitudinal, el movimiento de lazo alrededor de un eje vertical, así como el movimiento de vaivén paralelo al plano de rodadura.

El mecanismo de la interacción entre la vía y el vehículo conduce a elegir un orden de presentación algo artificial, pero que permite considerar los distintos fenómenos en orden creciente de complejidad, gracias a la independencia de las acciones correspondientes. Se consideran en primer lugar las solicitaciones verticales, cuyo cálculo resulta más sencillo de abordar. El estudio teórico de las solicitaciones horizontales resulta bastante más complicado, ya que los momentos de sujeción entre carril-travesía y el rozamiento travesía-balasto no responden a leyes elásticas: el carril está sometido a esfuerzos secundarios de torsión debidos a la excentricidad del punto de aplicación de los esfuerzos, y existe además un juego entre la pestaña de las ruedas y el carril que afecta al cálculo de estas solicitaciones.

Los análisis dinámicos proporcionan resultados sensiblemente diferentes de los estáticos, ya que tienen en cuenta cargas dinámicas aleatorias, ejercidas por las ruedas al

circular por una vía con defectos de nivelación y de trazado, que dependen a su vez de las características de la vía y del vehículo. Sin embargo, los numerosos ensayos realizados en vía permiten comparar los valores medidos in situ, que tienen un carácter estadístico, con los resultados de cálculos basados en hipótesis simplificadas y contrastar su validez. De cualquier forma, aunque los cálculos no desvirtúan la naturaleza de los fenómenos y facilitan su comprensión, es necesario recurrir a la experimentación para obtener los valores numéricos indispensables. Los estudios relativos a la circulación de trenes han contemplado cuatro aspectos fundamentales: la seguridad, la fatiga de los elementos constructivos de la vía, el confort de los viajeros y los impactos ambientales.

Este proyecto se ha dedicado al estudio de uno de esos cuatro aspectos, la seguridad, más concretamente al estudio del descarrilamiento de trenes de mercancías guiados por el bogie Y25.

### **1.1. Objetivos del proyecto**

El objetivo principal de este proyecto es elaborar un estudio sobre el grado de influencia que tienen distintos parámetros sobre el descarrilamiento de trenes con vagones que usan el bogie Y25. El bogie Y25 se utiliza en trenes de mercancías, por lo que no se ha tenido en cuenta el grado de confort que pueda llevar y se ha realizado el estudio variando parámetros como son el radio de la curva, la suspensión del bogie, la masa y la velocidad del vagón. El estudio se ha basado en simulaciones realizadas en el programa Adams/Rail, en el que primero se han unido las distintas partes del modelo, como la caja dividida en dos bloques unidas por un resorte a torsión para poder simular un comportamiento flexible del vagón, y los dos bogies, uno en la parte delantera y otro en la parte trasera.

A lo largo del estudio ha sido necesario cambiar propiedades de los bogies, del vagón, y de la vía para obtener resultados del coeficiente de descarrilamiento con respecto a la variabilidad de estos parámetros.

### **1.2. Estructura del proyecto**

El proyecto consta de cinco capítulos, siendo el primero de ellos la presente introducción.

En el capítulo 2 se describen elementos tanto de la vía como del bogie. Se explica la interacción entre el bogie y la vía mediante las teorías de Hertz y Kalker en las que se basa el programa Adams/Rail para el desarrollo de sus operaciones computacionales; y se presenta la Teoría de Descarrilamiento según Nadal y Laffite.

En el capítulo 3 se presenta el bogie Y25 y el programa Adams/Rail como herramienta para el análisis del descarrilamiento; y se describe la adaptación del bogie Y25 y sus elementos a dicho programa.

En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos en los análisis del Adams/Rail.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones sacadas del estudio en general y se comentan trabajos futuros.

## 2. Estado del arte

---

En este capítulo se llevan a cabo diversas definiciones del mundo ferroviario [1] como las partes de la vía y los elementos que constituyen un bogie, se desarrollan las teorías de contacto de Hertz y Kalker que definen el comportamiento físico del contacto entre rueda y raíl, así como la teoría de descarrilamiento según Nadal y Laffite.

### 2.1 La vía

La vía es el camino por el que circulan los trenes. Por ello, su función consiste en el guiado de los mismos de la forma más segura y económica posible. Cualquier fallo en la nivelación y alineación de la misma produce vibraciones en el tren, repercutiendo en el confort de los pasajeros; e incluso podría causar daños en la estructura.

#### 2.1.1. El ancho de vía

El ancho de vía de un ferrocarril es la mínima distancia entre las caras activas de las cabezas de sus carriles, medida a 15 mm por debajo del plano de rodadura (figura 2.1). En las curvas se suele añadir unos milímetros más (llamado sobreancho) para facilitar el paso de las ruedas.



Figura 2.1: Ancho de vía

Cuanto mayor sea el ancho de vía mayor es la estabilidad de los trenes y las vías anchas son mejores para el tráfico pesado, pero la construcción de las estrechas es más

económica. Además, los trenes de vía estrecha no son forzosamente más angostos que los de vía ancha; generalmente sí lo son, pero la anchura de un tren no está determinada sólo por la de las vías, sino también por la elección del gálibo. En la tabla 2.1 se muestran los diferentes anchos de vía que existen en España.

Tabla 2.1: Anchos de vía

Metro de Barcelona.	1.674 mm.
Renfe Actual.	1.668 mm.
Metro de Madrid + TFM.	1.445 mm.
AVE + FGC + Metro de Barcelona.	1.435 mm.
Feve + ETB + FGC + FGV + SVM.	1.000 mm.
Renfe Antiguo.	1.674 mm.

La estructura de la vía está constituida principalmente por: los carriles, las traviesas, placas de asiento, sujeciones del carril, el balasto, el sub-balasto y la plataforma.

### 2.1.2 El carril

El carril es el elemento que sirve de guiado del tren, absorbe, resiste y transmite a las traviesas los esfuerzos recibidos, puede llevar además señales eléctricas. La forma y los elementos (figura 2.2) que lo componen son:

- La cabeza es la superficie de rodadura. Es la parte del carril que sufre el desgaste.
- El alma une el patín con la cabeza y tiene espesor uniforme (del orden del 25% de la anchura de la cabeza), es más ancha en la base.
- El patín es el ala inferior del perfil; debe tener la anchura suficiente para que la superficie de apoyo sobre la traviesa sea grande y haya un mejor reparto de presiones.

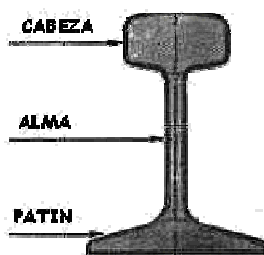


Figura 2.2: Carril

En España el peso del carril es en la actualidad de 54 kg/m en las líneas principales y de 42.5 kg/m y 45 kg/m en las líneas secundarias. En el resto de Europa el peso oscila entre 50 kg/m y 60 kg/m. En el caso de trenes de alta velocidad el peso mínimo es de 60 Kg/m.

La longitud comercial de fabricación de los carriles es de 18 metros, lo que implica que para formar una vía hay que empalmarlos mediante bridas, dejando unas juntas de dilatación para posibles problemas térmicos.

### 2.1.3. Traviesas

Se denomina traviesa a los travesaños sobre los que se apoyan los carriles por intermedio de las placas de asiento.

El objeto de las traviesas es repartir las cargas que soportan los carriles sobre la capa de balasto, así como servir de apoyo y arriostamiento de los mismos.

Las traviesas utilizadas son de madera y hormigón armado.

### 2.1.4 El balasto

Se llama balasto a la capa permeable de piedra partida que se coloca debajo de las traviesas.

Su objeto es repartir de forma uniforme, sobre la explanación las presiones que se producen al paso de los trenes, sirviendo a la vez de cama elástica para amortiguar las cargas dinámicas producidas al paso de las circulaciones. Otro de sus objetivos es evitar el encharcamiento de la vía, permitiendo que las aguas puedan pasar fácilmente a través de ella.

Las principales características que ha de reunir un buen balasto son:

- Naturaleza de la piedra: el balasto deberá ser de caliza, cuarcita, granito, afeita o cualquier otro material pétreo.

- Resistencia: debe tener la suficiente resistencia - para que no se rompa al ser sometido al bateado mecánico o manual.

- Forma y resistencia: Los granos de balasto deberán ser de forma poliédrica y con aristas vivas. Su tamaño deberá estar comprendido entre 5 y 8 cm aproximadamente en su dimensión mayor (de madera) admitiéndose un 10% en menos de 3 cm y un 5% con más de 6 cm (3 a 5 hormigón).

- Limpieza: debe estar completamente exento de tierra u otras impurezas a fin de que no pierda su permeabilidad.

El espesor del balastro bajo las traviesas deberá ser de:

- En vías de primer orden: 30 cm.
- En vías de segundo orden: 20 cm.

## 2.2 El bogie

El bogie es uno de los elementos más importantes junto con las cajas y los enganches. Los bogies comienzan a utilizarse por la necesidad de compatibilizar la distribución del peso del vehículo en más de dos ejes con el paso del vehículo por curvas sin que se generen esfuerzos excesivos.

Las ventajas alcanzadas con este modo de suspensión en cuanto a rodadura del material son la facilidad de la inscripción en curva al disminuir la base rígida del vehículo, que queda reducida a la de los bogies independientes y la suavidad de la rodadura, ya que las desnivelaciones verticales de la vía (figura 2.3) solo repercuten por la mitad de su valor sobre la caja del vehículo, reduciéndose de este modo los choques perceptibles en aquélla [2].

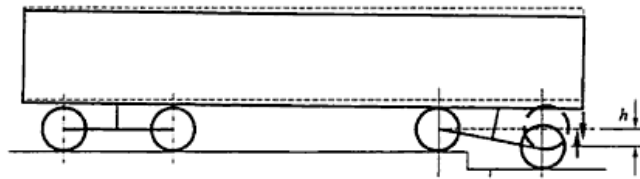


Figura 2.3: Vehículo articulado ante una desnivelación

Otras de las ventajas importantes del empleo de bogies es que se tiene mayor libertad para la disposición de los muelles que en el material rígido. Así, sin recurrir a construcciones complicadas, pueden montarse grupos de resortes en serie, cada uno con propiedades particulares para la atenuación de los efectos de los choques y de las oscilaciones.

Los bogies giratorios o pivotantes se adaptan fácilmente a las condiciones de la vía sobre todo a la entrada y paso de las curvas, así como a una posición defectuosa en alineación recta sin afectar a la caja del vehículo.

Un choque lateral sobre una de sus ruedas imprimirá al bogie un movimiento de rotación, por consiguiente, la energía de choque se convierte ya parcialmente en los bogies en energía cinética, haciéndose el choque más inofensivo y menos perceptible en la caja. Así mismo, absorben los movimientos de lazo.

En la actualidad, los vehículos ferroviarios se componen de una caja o cuerpo soportado por los bogies o carretones con sistemas de suspensión en dos etapas.

En los vehículos de pasajeros, debido a las altas velocidades de circulación se busca una adecuada equalización de las cargas entre los ejes y unos movimientos adecuados tanto verticales como longitudinales y laterales. En la figura 2.4 se muestra un prototipo de bogie para trenes de pasajeros. Los destinados al transporte de mercancías presentan una menor complejidad. De forma adicional, los bogies de los vehículos tractores deberán soportar las sollicitaciones provenientes de los esfuerzos motrices aplicados.

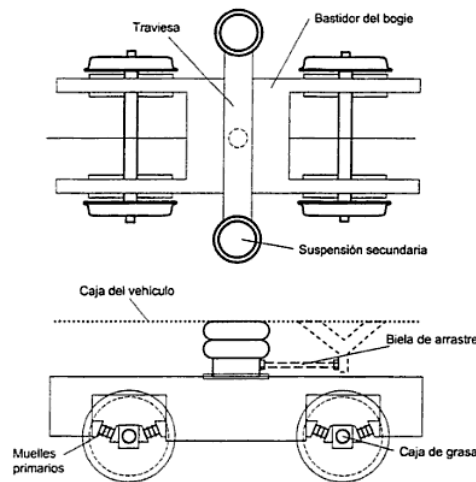


Figura 2.4: Bogie de vehículo de pasajeros

### 2.2.1. Clasificaciones de los bogies

Como clasificación primaria o básica, los bogies se pueden clasificar en dos grandes grupos [3]:

- bogies motores: están provistos por un motor para su autopropulsión o para la tracción del material rodante.
- bogies remolques o remolcados: unidades ferroviarias que incorporan bogies intermedios no motorizados.

Los bogies también pueden ser articulados o compartidos que es una variante de bogie que tiene la peculiaridad de servir de apoyo de dos cajas distintas, se muestra un ejemplo en la figura 2.13.

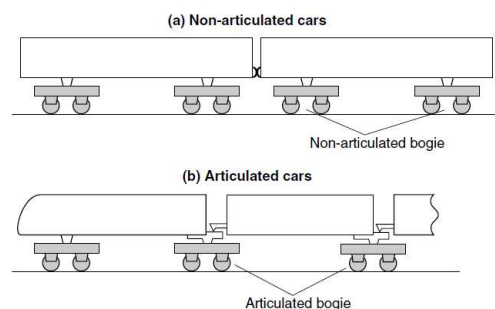


Figura 2.5: Tipos de enganche entre vagones

La principal diferencia existente entre los bogies articulados y los no-articulados, son las desventajas presentes en el bogie articulado, tales como: una estructura más compleja, aumento de la carga por eje y dificultad de mantenimiento, pero también presenta ventajas importantes para su utilización como pueden ser, un menor centro de gravedad, mayor confort, debido a que el final del vagón no sobresale del bogie y, por último, consiguen disminuir el ruido presente en el vagón, ya que los asientos no están situados sobre los bogies.



### 2.2.2. Funciones de los bogies

Las funciones principales de los bogies [4] son:

- Transmitir la carga vertical de las ruedas del vehículo a los raíles.
- Guiar el vehículo a lo largo de la vía.
- Trabajar de forma estable tanto en recta como en curva
- Control de las fuerzas dinámicas, debido a las irregularidades del movimiento sobre la vía, en curvas y también debida a los impactos entre coches.
- Amortiguador eficiente frente a oscilaciones.
- Aplicación de las fuerzas de tracción y frenada.
- Minimiza la generación de irregularidades en la vía, disminuyendo la abrasión.
- Garantiza el confort, debido a la capacidad de absorber las vibraciones causadas por las irregularidades de la vía, así como, minimizar la acción de la fuerza centrífuga en el paso por curva.

### 2.2.3. Composición de los bogies

Los bogies están básicamente constituidos por los siguientes conjuntos:

- El bastidor

Se denomina bastidor, figura 2.14, a la estructura metálica, normalmente de acero soldado. Esta está sometida a requerimientos extremadamente exigentes en lo referente a métodos de fabricación, tanto de conformado de los palastros y chapas; como en lo que respecta a soldaduras y procesos de homogeneización térmica de las mismas. Las sollicitaciones a las que se encuentran sometidos los bastidores de bogies aconsejan que, si bien su mantenimiento en el tiempo debe ser mínimo o nulo reduciendo a operaciones de limpieza y repintado si no hay otro tipo de problemas, se deba evitar cualquier daño en los mismos que pueda ser origen del comienzo de una grieta por fatiga; así se deben evitar golpear sus partes mecánicas, producir daños incisivos en soldaduras, soldar nuevos elementos a los mismos sin proceso de homogeneización térmica posterior, etc.

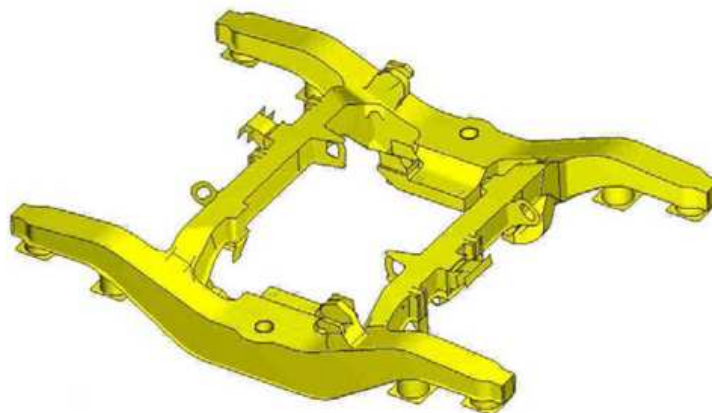


Figura 2.6: Bastidor de un bogie

- Eje y ruedas

El eje y las ruedas son elementos de especial importancia en los ferrocarriles. Los principales problemas que surgen sobre ellos son el desgaste, ruidos, vibraciones, etc. El eje y las ruedas se pueden unificar consiguiendo el “eje calado”, mostrado en la figura 2.15, de manera que las ruedas comparten la misma velocidad angular.

El eje calado proporciona los medios de transmisión de las fuerzas de tracción y de frenado a los raíles para acelerar y decelerar el vehículo y el movimiento de lazo.

El principal problema de los ejes calados es el desgaste entre la rueda y el raíl, debido a que la rueda tiene que recorrer más distancia por el carril exterior que por el carril interior; ya que, como el número de revoluciones es el mismo, se producirá un deslizamiento en una de las ruedas, o incluso en las dos. La solución a dicho problema, consiste en fabricar la superficie de rodadura de las ruedas con un perfil cónico cuyo ángulo y de inclinación sea variable con respecto al eje montado.

Un eje montado libre con perfiles cónicos se moverá lateralmente en una curva, de tal forma que la rueda externa esté rodando en un radio más grande (debido al ángulo del cono) que el interno. Para cada radio de la curva solamente existe un valor de la conicidad que elimina el deslizamiento, por lo tanto, el deslizamiento mínimo depende de las características de la vía.

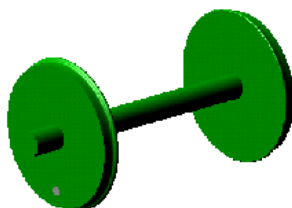


Figura 2.7: Eje calado

Las ruedas y los ejes de transmisión son las partes más críticas del material rodante ferroviario. Un fallo mecánico o un exceso en las dimensiones del diseño pueden causar el descarrilamiento.

De forma general, las ruedas permiten:

- Soportar el peso del vehículo. Por término medio, un vehículo de viajeros pesa 17 T/eje y un vehículo de mercancías puede llegar a las 22.5 T/eje, aunque está en estudio la ampliación a 25 T/eje en Europa.

- Guiar al vehículo por la vía. Los vehículos ferroviarios no circulan por la vía en línea recta, sino que realizan una trayectoria sinusoidal conocida como movimiento de lazo. La rueda guía al vehículo mediante la pestaña y una ligera inclinación de la banda de rodadura y en las curvas soportan la reacción debida a la fuerza centrífuga.

- Frenar y traccionar al vehículo. En los trenes de mercancías, un freno de zapata actúa sobre la banda de rodadura, existiendo un peligro de calentamiento en distancias de frenado largas.

La llanta es la parte de la rueda que establece contacto con el carril, proporcionando la superficie de rodadura de la rueda sobre el mismo y, por tanto, está sometida al desgaste y choques propios de la rodadura.

Aunque inicialmente las llantas iban caladas sobre el centro de rueda, en la actualidad suelen construirse en un solo bloque [2]. Las llantas van provistas de un reborde o pestaña saliente, representado en la figura 2.16 y su perfil ha de ser tal que permita restablecer dicha superficie con el menor gasto posible de material cuando sea modificada por el uso. A la vez, su espesor debe asegurar la mayor duración útil.

La superficie de rodadura presenta normalmente una cierta inclinación sobre la horizontal, llamada conicidad, siendo, generalmente, su inclinación de 1/20 en el centro de la llanta, y sobre una longitud de 55 a 65 mm, y de 1/10 en el extremo opuesto a la pestaña. En cambio, otros ferrocarriles, como los ingleses, reducen frecuentemente la conicidad a los valores respectivos de 1/40 y 1/80. Modernas construcciones llegan a conicidades de 1/100 o incluso a ruedas cónicas, sobre carriles verticales.

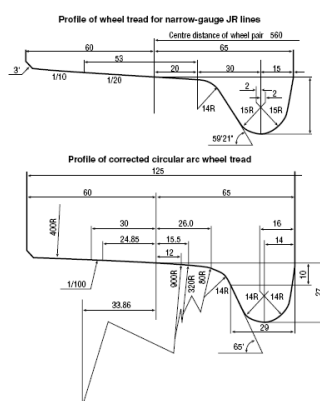


Figura 2.8: Perfil de llanta

Las ruedas convencionales suelen tener un diámetro de 860 mm cuando están nuevas. Debido al elevado desgaste a la que están sometidas desde el punto de vista de la rodadura y del servicio corriente, los materiales para su construcción deben tener un elevado contenido de carbono y alta resistencia a la tracción. Las ruedas sometidas a temperaturas elevadas como consecuencia del frenado por zapatas, deben tener un escaso contenido en carbono para evitar deterioros por causas térmicas.

Las ruedas son susceptibles de padecer desequilibrio de masa, lo que provoca las vibraciones en la propia rueda y en el eje, la cual, se transmite al vagón. Desde 1984, se ha estado trabajando en este aspecto con el objetivo de mantener este desequilibrio por debajo de 25 kg·cm.

Por último, cabe destacar la existencia de las ruedas onduladas con una cara exterior ondulada. Han sido comercializadas para aumentar su rigidez, siempre y cuando se consigue reducir el espesor del disco y el peso. Este tipo de ruedas han sido utilizadas desde 1980 en trenes de cercanías y corta distancia.

Con respecto a los ejes, se puede decir que son generalmente sólidos, pero pueden utilizarse otros tipos con el objetivo de disminuir el peso, pero sin afectar a su resistencia. Por ese motivo, ejes huecos han sido utilizados en trenes eléctricos de alta velocidad y en coches

de pasajeros después de 1950; pero su uso fue abandonado por problemas de fabricación. Alrededor de 1975, para mejorar la fiabilidad de los ejes huecos, se empezaron a fabricar mediante la perforación de un eje macizo.

- Caja de grasa

Se denomina caja de grasa, figura 2.17, al elemento que permite el enlace entre el eje y la suspensión del vehículo ferroviario, transmitiendo todos los esfuerzos y permitiendo el giro del propio eje. Recibe este nombre porque tradicionalmente se trataba de un receptáculo que envolvía un cojinete de fricción, protegiéndolo y sirviendo para contener el lubricante de engrase. Sin embargo, actualmente las cajas de grasa contienen rodamientos de bolas, de rodillos cilíndricos o de rodillos cónicos.

Se trata de un elemento crítico para el rendimiento, ya que de su diseño dependen importantes factores como el confort y el diseño de la estructura del bogie.

La caja de grasa transmite fuerzas longitudinales, laterales y verticales del eje montado sobre los otros elementos del bogie. Las fuerzas verticales y longitudinales son transmitidas a través de la superficie interna del cojinete y las fuerzas laterales por sus caras.

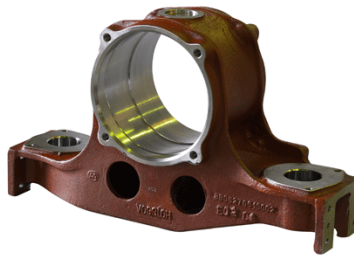


Figura 2.9: Caja de grasa

- Reductores

La elevada velocidad a la que giran los motores de tracción con unas curvas de características en servicio continuo de hasta 5000 rpm obliga a la interconexión entre motor y eje a través de sistemas de engranajes reductores de velocidad. Estos sistemas, de los que existen muy diversos tipos en el mercado ferroviario, se diferencian entre sí tanto por las etapas de desmultiplicación que incorporan 2, 4, 6 como por el sistema de apoyo en el eje y transmisión al mismo.

- Suspensión

La suspensión en vehículos ferroviarios es más compleja que otros sistemas mecánicos. Ésta depende del tipo de configuración que se emplee en el vagón. Normalmente en vagones de mercancías, la suspensión puede ir en una única etapa uniando así los ejes con la caja. Sin embargo, en coches de pasajeros la caja va montada sobre bogies, y la suspensión va colocada en dos etapas, una primaria situada entre los ejes y el bogie y una secundaria entre este y la caja.

El utilizar bogies se debe principalmente a la necesidad de conseguir una distribución de pesos mas repartida y conseguir así una reducción de esfuerzos en los ejes, sobre todo en trazados curvos.

Las funciones de la suspensión son el filtrado de las vibraciones, la transmisión de esfuerzos y el guiado de las ruedas. Existen diferentes soluciones validas para la suspensión:

- Ballestas (figura 2.18).

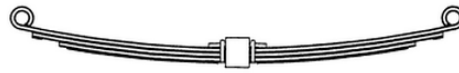


Figura 2.10: Ballesta

- Muelles helicoidales (figura 2.19).

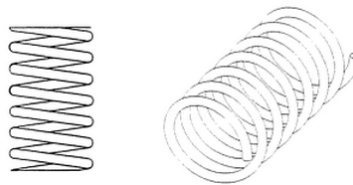


Figura 2.11: Muelle helicoidal

- Muelles helicoidales de fleje (figura 2.20).

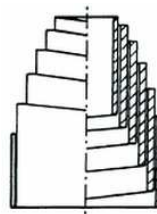


Figura 2.12: Muelles helicoidales de fleje

- Barras de torsión (figura 2.21).

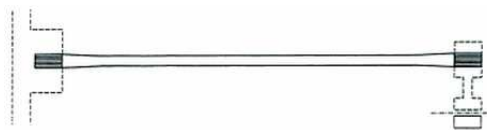


Figura 2.13: Barras de torsión

- Muelle Belleville (figura 2.22).

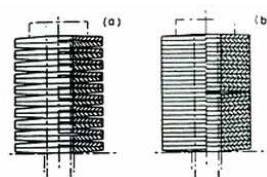


Figura 2.14: Muelle Belleville

-Muelle de anillos (figura 2.23).

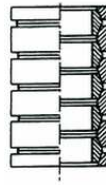


Figura 2.15: Muelle de anillos.

-Muelles de elastómeros (figura 2.24), de caucho o materiales compuestos.

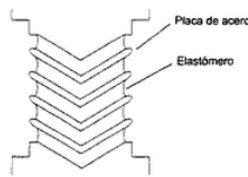


Figura 2.16: Muelle de goma para solicitaciones combinadas verticales y laterales

-Elementos elásticos neumáticos.

#### - **Suspensión primaria**

La suspensión primaria, por un lado, disminuye el nivel de vibraciones que soporta el bastidor de bogie y, por tanto, asegura un reparto homogéneo de cargas sobre las ruedas. Esto es fundamental de cara al frenado, la tracción y evitar el riesgo de descarrilamiento.

Existen diferentes soluciones de suspensión primaria, desde amortiguamientos por fricción en algunos vagones de mercancías a complejos diseños que tratan de reducir el espacio, coste y mantenimiento de los sistemas. La suspensión primaria está relacionada con el guiado de los ejes en dirección longitudinal y lateral. La rigidez del guiado influye en la estabilidad dinámica del vehículo y los esfuerzos rueda-carril.

Entre las soluciones constructivas para asegurar el apoyo vertical cabe destacar:

- Apoyo con elemento elástico en cada rueda (figura 2.5). Con uno o dos elementos elásticos que enlazan cada caja de grasa con el bastidor del bogie.

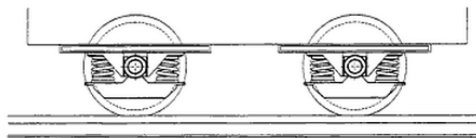


Figura 2.17: Apoyo vertical con elementos elásticos independientes

- Apoyo por elementos elásticos conjugados (figura 2.6). En determinados tipos de bogies, debido a la forma de unión con la caja del vehículo, se debe utilizar este tipo de solución para evitar diferencias importantes de carga entre los dos ejes del mismo bogie.

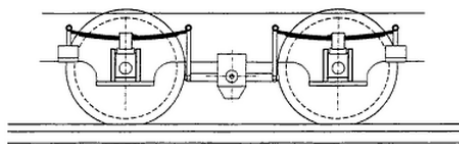


Figura 2.18: Apoyo vertical por elementos elásticos conjugados y equalización de fuerzas entre dos ejes con suspensión de ballesta

- Apoyo por balancín entre cajas (figura 2.7). Consiste en unir las cajas de grasa por un balancín no suspendido, colocando los elementos elásticos entre éste y el bastidor del bogie.

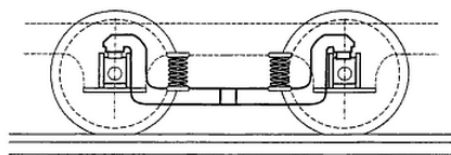


Figura 2.19: Disposición de un bogie de cuatro ruedas con "semiequalización" de la carga y apoyo vertical por balancín entre cajas

Entre las soluciones constructivas para asegurar el arrastre longitudinal cabe destacar:

- Por resbaladeras de las cajas de grasa (figura 2.8). Tipo de guiado clásico donde la caja de grasa desliza verticalmente entre resbaladeras planas con rebordes laterales, haciendo incluso de guiado transversal.

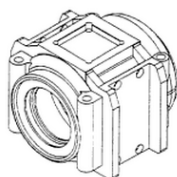


Figura 2.20: Caja de grasa para guiado por resbaladera

- Por resbaladeras cilíndricas o caja de cañones (figura 2.9). Evolución del diseño anterior utiliza dos cilindros concéntricos para el guiado, uno solidario a la caja de grasa y otro al bastidor, con un casquillo de fricción para mejorar el movimiento sin fricción entre ambos. Suele disponer de dos cilindros por caja de grasa, que suelen ir en la parte interior de los muelles, sirviendo de fijación a éstos.

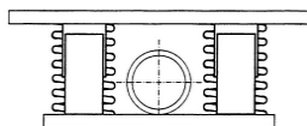


Figura 2.21: guiado longitudinal por cilindros concéntricos

- Por bieletas, (figura 2.10) se utilizan dos bieletas articuladas por elementos elásticos de caucho (*silentblocs*). Las disposiciones de las bieletas pueden presentar disposiciones variadas.

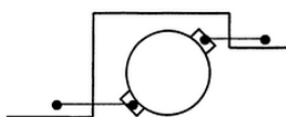


Figura 2.22: Arrastre por medio de bieletas

- Por brazo longitudinal (figura 2.11). Un brazo longitudinal articulado con el bastidor del bogie por medio de un elemento elástico de caucho.

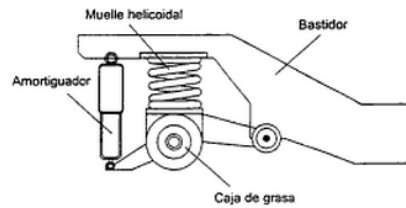


Figura 2.23: Suspensión primaria de brazo articulado longitudinal

- Por bieleta única (figura 2.12). Cuando se dispone de un balancín que enlaza las dos cajas de grasa, con una sola bieleta se asegura el arrastre longitudinal.

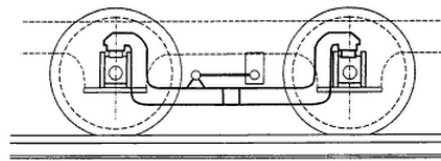


Figura 2.24: Arrastre por bieleta única

Para asegurar el guiado transversal se utilizan soluciones como resbaladeras planas o cilíndricas. Al ser éstas de rigidez elevada, las cajas de grasa poseen holguras, especialmente en bogies de tres ejes.

En general, en vagones de mercancías el guiado se hace por resbaladeras en la caja de grasa, son dos muelles como elementos elásticos y con disipación por fricción. Otras suspensiones utilizan como elemento elástico y disipativo el caucho, ya que son bastante económicas porque evita la utilización de amortiguadores y de elementos de guiado. Sin embargo, presenta el inconveniente de la dificultad de elegir las características de rigidez adecuada en las tres direcciones y el deterioro con pérdida de altura por fluencia del material.

En vehículos más evolucionados de pasajeros, se disponen de muelles helicoidales y amortiguadores, mientras el guiado longitudinal y lateral se asegura mediante dos bieletas longitudinales dispuestas en alturas diferentes. Es útil cuando hay problemas de espacio. Sin embargo, no se consigue una buena relación entre la rigidez lateral y la longitudinal, siendo además bastante cara y pesada.

Otros diseños más económicos, compactos, ligeros y que permiten una variada elección de las características de suspensión, utilizan un resorte helicoidal sobre la caja de grasa, un amortiguador hidráulico vertical y un silentbloc de goma que enlaza con el bastidor del bogie asegurando el guiado horizontal.

### - **Suspensión secundaria**

La suspensión primaria está más enfocada desde un punto de vista de la estabilidad y del correcto guiado del vehículo. La suspensión secundaria también garantiza el correcto reparto de pesos y además influye significativamente en el confort del tren. Por tanto debe



depurar la filtración de las vibraciones tanto en dirección vertical como lateral. Por ese motivo las suspensiones secundarias requieren una gran flexibilidad.

En la dirección vertical normalmente se utilizan suspensiones con frecuencia natural próxima a 1 Hz. En la dirección lateral tradicionalmente se ha utilizado suspensiones pendulares de  $\frac{1}{2}$  metro, que equivalen a una frecuencia natural de 0.7 Hz, valor que se sigue estableciendo como criterio.

Para conseguir el apoyo vertical entre la caja y el bogie, se emplean las siguientes soluciones [2]:

-Pivote central (figura 2.25). Utiliza un pivote central unido a la caja de cabeza esférica y una quicionera esférica en el bogie. Se trata de un apoyo sin efecto antigalope. Se utilizan unos equilibradores laterales elásticos que permiten el giro del bogie controlando el balanceo de la caja y consiguiendo también un efecto antilazo.

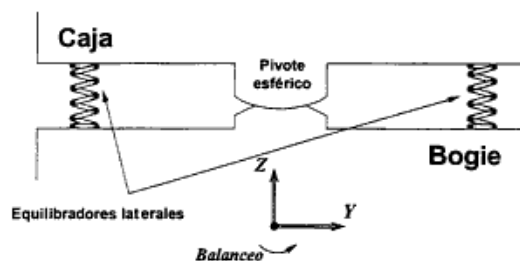


Figura 2.25: Soporte vertical por pivote central cilíndrico o esférico

-Apoyo en dos puntos. Utilizado como apoyo vertical y para controlar el galope del bogie o cuando se desea que su eje permanezca paralelo a la caja. Se sustituye el pivote central por dos apoyos en el eje longitudinal. Una solución son los pivotes muletas que se pueden ver en la figura 2.26, con dos conos de caucho. Estos pivotes se mantienen en posición vertical por medio de bieletas elásticas laterales.

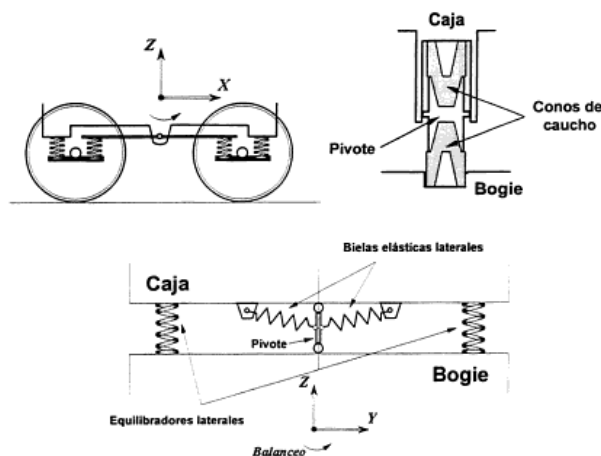


Figura 2.26: Apoyo vertical en dos puntos

-Apoyo de la caja en soportes laterales. El peso de la caja reposa sobre dos apoyos laterales que pueden ser o no elásticos. Si para permitir el giro entre el bogie y la caja utilizan deslizaderas, el par de rozamiento sirve de efecto antilazo.

Para conseguir el arrastre longitudinal entre caja y bogie, se emplean las siguientes soluciones:

-Apoyo en eje longitudinal. Se trata del apoyo en dos puntos descrito con anterioridad.

-Pivote de arrastre (sin apoyo vertical). Utilizado cuando la caja se apoya en soportes laterales, dado que estos no sirven para el arrastre longitudinal (figura 2.27).

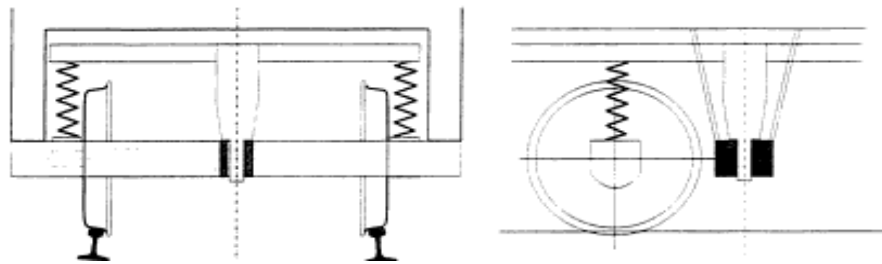


Figura 2.27: Arrastre longitudinal por pivote

- Amortiguación

Con respecto a la amortiguación, cabe destacar que de manera general en el ámbito ferroviario es utilizada la fricción seca o viscosa.

La fricción seca se produce por el rozamiento relativo de dos cuerpos en contacto, la fuerza de fricción producida puede ser constante o dependiente de la masa de la carrocería del vehículo.

$$F_{fric. sec} = -\mu S Q \frac{\dot{z}}{|\dot{z}|} = -F_0 \frac{\dot{z}}{|\dot{z}|} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde

$F_0$  = Magnitud de la fuerza de fricción

$\dot{z}$  = Velocidad relativa del movimiento

$|\dot{z}|$  = Magnitud de la velocidad

La fricción viscosa consiste, de manera general, en un líquido viscoso que fluye por un orificio, disipando así la energía. En el caso de fricción viscosa, la fuerza de amortiguamiento es siempre proporcional a la velocidad.

### **2.3. Contacto rueda-carril**

A diferencia de otras formas de transmisión de potencia, el mecanismo de una locomotora se basa en la fuerza entre las ruedas y los carriles. En circunstancias desfavorables se puede llegar al límite, produciéndose un fallo en forma de patinaje o deslizamiento de la rueda. La fuerza máxima que puede ser transmitida depende de la carga que soportan las ruedas motrices. El valor máximo de la fuerza de adherencia es producto del coeficiente de fricción entre las llantas y los carriles y la carga soportada por las ruedas motrices. Por tanto, la adherencia representa una limitación del esfuerzo tractor producido por una locomotora.

Al principio de la era del ferrocarril, muchos científicos creyeron que el coeficiente de fricción existente entre las ruedas y los carriles no sería suficiente para permitir a la locomotora que ejerciese un valor suficiente de esfuerzo tractor. De hecho en 1811, Blenkinsop [2], produjo una locomotora con ruedas dentadas que engranaban en una serie de cremalleras horizontales. George Stephenson llevó a cabo un experimento para constatar las posibilidades de la adherencia antes de construir su primera locomotora en 1814. Desarrollos posteriores han incrementado no solo de adherencia sino también la proporción del peso total adherente, llegándose al 100% con la llegada de las locomotoras eléctricas o diesel-eléctricas alrededor de 1950.

La modelización del contacto rueda-raíl, es uno de problemas más importantes en el comportamiento dinámico ferroviario. Pero debido a la complejidad presente en el desarrollo de las ecuaciones que describen su comportamiento, el contacto rueda-raíl, se trata de uno de los fenómenos menos conocidos en el ámbito ferroviario.

Para conocer lo que ocurre en la zona de contacto, es necesario estudiar el comportamiento de dos sólidos elásticos con un movimiento de rodadura entre ellos, bajo la acción de cargas tanto normales como tangenciales a la zona de contacto. Esta zona de contacto se puede dividir a su vez en dos zonas.

- Zona de adhesión.
- Zona de deslizamiento.

En los últimos 100 años han aparecido diferentes teorías que tratan de definir tanto la forma como la extensión de cada una de las zonas del área de contacto. La primera teoría que intentaba explicar este fenómeno, fue la desarrollada por Carter [5] en 1926; Carter consideró la superficie de contacto como una franja rectangular, por lo que su principal problema es que solo tenía en cuenta los pseudo-deslizamientos longitudinales.

En 1958, Johnson [6] transformó la teoría de Carter, debido a que consideraba una superficie de contacto circular, teniendo en cuenta, por consiguiente tanto los pseudo-deslizamientos longitudinales y transversales.

Pocos años después, en 1964, Johnson con la ayuda de Vermeulen [7], definieron la forma de la zona de contacto como elipsoidal, la cual estaba dividida en dos regiones asimétricas: una zona de adhesión y otra de deslizamiento.

Entre 1963 y 1964, se desarrolló una teoría para el pseudo-deslizamiento longitudinal puro, gracias a los estudios realizados por Haines y Ollerton [8] y de Halling [9]. En estos estudios se dividía el área de contacto en franjas paralelas a la dirección de rodadura, y a cada una de estas franjas era aplicable la teoría desarrollada por Carter. Esta teoría fue comprobada mediante resultados experimentales, comprobando su validez y pudiendo ser utilizada a día de hoy en el caso de que solo existan pseudo-deslizamientos longitudinales.

Por último, Kalker [10], en 1967 desarrolló una teoría que se caracterizaba por la suposición de que las fuerzas de contacto tangenciales y los pseudo-deslizamientos eran lineales; en la que se pudo comprobar que si los pseudo-deslizamientos longitudinales, transversales y de giro son muy pequeños, el área de adhesión representa toda la zona de contacto. Esta teoría, aunque es muy utilizada, hay que tener en cuenta sus limitaciones, por este motivo, Kalker desarrollo una teoría más exacta, la cual tiene el inconveniente de que su uso supone un gran coste computacional, por este motivo hay que tener en cuenta al usar esta última teoría de Kalker, los beneficios obtenidos en relación al tiempo computacional necesario para llevarlo a cabo.

Todas estas teorías consideran un comportamiento Hertziano, así como que las características físicas de ambos cuerpos en contacto son casi idénticas; estas suposiciones simplifican mucho el problema y tienen la ventaja de que se puede dividir el problema normal del tangencial, pudiendo obtener por separado la fuerza normal y la forma de la superficie de contacto, a partir del problema normal y las fuerzas en el contacto, mediante el problema tangencial.

Dado que en la actualidad se utiliza la totalidad del peso como adherente, el incremento constante de la potencia, tanto en locomotoras eléctricas, como en diesel-eléctricas, sin aumentar proporcionalmente el peso, significa que la relación entre el esfuerzo tractor y el peso adherente esta siendo llevada al limite de tal modo que la adherencia se ha vuelto un problema. Aún cuando se han mejorado frecuentemente detalles del diseño, los fallos en uso debidos al patinaje o deslizamiento son todavía muy comunes.

### Deslizamiento

El comportamiento dinámico de un vehículo ferroviario se ve seriamente afectado por las fuerzas de interacción entre rueda y carril [2]. Estas fuerzas dependen de la adherencia, el deslizamiento y las características del contacto. La geometría de la rueda y los perfiles del carril afectan a estos parámetros, así como el comportamiento dinámico del vehículo, debido a que las fuerzas de deslizamiento se ven influenciadas en gran medida por el área de contacto y las tensiones de fricción entre la rueda y el carril. La rugosidad de la superficie, las condiciones ambientales, la contaminación debida a la suciedad, agua, aceite o nieve y otros factores influyen en las condiciones de deslizamiento, adherencia y contacto. También juegan un papel muy importante los materiales de la rueda y el carril.

El fenómeno del deslizamiento aparece cuando dos cuerpos rígidos son presionados uno contra el otro con una fuerza determinada y se permite a cada uno girar sobre el otro. Se forma una región de contacto en el punto de unión, como puede verse en la figura 2.28.

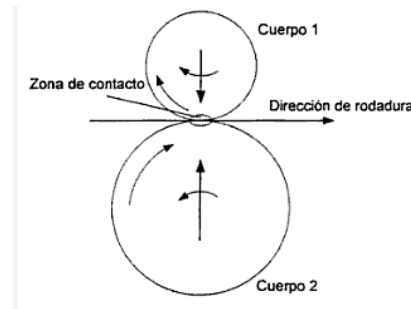


Figura 2.28: Dos cuerpos en contacto de rodadura

De acuerdo con la teoría estática de Hertz, la región de contacto es elíptica y el radio de los semiejes (a/b) puede ser calculado conociendo el radio principal de curvatura de los cuerpos de revolución. Para calcular las dimensiones reales, a y b, se debe conocer la fuerza normal. Si los cuerpos son esferas o uno de ellos es una esfera y el otro una superficie plana, la forma de la región de contacto será circular.

En general, las velocidades circunferenciales de dos cuerpos que ruedan uno sobre el otro no son iguales. Para definir las desviaciones respecto al movimiento puro de rotación de los dos cuerpos se utiliza el término deslizamiento, que es adimensional. El deslizamiento se define en las dos direcciones, longitudinal y transversal. Carter fue el pionero en el estudio de la influencia del deslizamiento en la dinámica de los vehículos ferroviarios. De este modo, definió el deslizamiento longitudinal  $\varepsilon_x$  y el lateral  $\varepsilon_y$  como:

$$\varepsilon_x = \frac{\text{velocidad longitudinal real} - \text{velocidad longitudinal rodadura pura}}{\text{velocidad longitudinal rodadura pura}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\text{velocidad lateral real} - \text{velocidad lateral rodadura pura}}{\text{velocidad lateral rodadura pura}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Otro término es el deslizamiento de giro, que se define cuando dos cuerpos rotan alrededor de un eje normal al plano del área de contacto, como puede verse en la figura 2.29. El deslizamiento de giro se define como:

$$\varepsilon_{sp} = \frac{\text{velocidad angular cuerpo superior} - \text{velocidad angular cuerpo inferior}}{\text{velocidad nominal de rodadura}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$



Figura 2.29: Deslizamiento y fuerzas de rozamiento

Es bien sabido que los sistemas mecánicos sujetos a fuerzas no conservativas se convierten en dinámicamente inestables. En los vehículos ferroviarios, las fuerzas no conservativas proceden del fenómeno del deslizamiento.

Las fuerzas de deslizamiento se desarrollan a causa de la diferencia de deformación de ambos cuerpos en la zona de contacto. Para calcular los esfuerzos de deslizamiento longitudinal y lateral y el momento de deslizamiento de giro en la interacción rueda-carril, es esencial comprender la zona de contacto para poder así establecer las relaciones existentes entre los deslizamientos longitudinal, lateral y de giro. Se ha propuesto varias teorías desarrolladas a continuación y que hay que considerar ya que el programa de Adams/Rail basa su análisis en estas teorías.

### 2.3.1. Teoría de Hertz. Problema normal

Cuando dos cuerpos rígidos se presionan uno contra otro con la aplicación de una fuerza normal, se forma una región de contacto alrededor del punto donde se tocan. La forma y tamaño de esta región entre dos cuerpos elásticos en contacto estático viene dada por la solución estática de Hertz [11]. Si la rueda y el carril son de dos materiales diferentes, de acuerdo con la solución de Hertz, la región de contacto será una elipse. Los semiejes  $a$  y  $b$  de esta elipse de contacto en las direcciones longitudinal y lateral serán:

$$a = m \cdot \left[ \frac{3 \cdot \pi \cdot N}{4} \cdot \frac{K_1 + K_2}{K_3} \right]^{1/3} \quad b = n \cdot \left[ \frac{3 \cdot \pi \cdot N}{4} \cdot \frac{K_1 + K_2}{K_3} \right]^{1/3} \quad \text{Ecuaciones 2.5 y 2.6}$$

donde  $N$  es la fuerza normal total y:

$$K_1 = \frac{1 - \nu_w^2}{\pi \cdot E_w}; \quad K_2 = \frac{1 - \nu_R^2}{\pi \cdot E_R}; \quad K_3 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R'_w} + \frac{1}{R_R} + \frac{1}{R'_R} \right) \quad \text{Ecuaciones 2.7, 2.8 y 2.9}$$

donde:

$R_w$  = Radio de curvatura de la rueda.

$R'_w$  = Radio de curvatura transversal de la rueda.

$R_R$  = Radio de curvatura del raíl.

$R'_R$  = Radio de curvatura transversal del raíl.

$\nu_i$  = Coeficientes de Poisson de la rueda o raíl.

$E_i$  = Modulo de Young de la rueda o raíl.

$m, n$  = Coeficientes dependientes del ángulo  $\theta$ , el cual forman los planos normales que contienen a las curvaturas  $\frac{1}{R_w}$  y  $\frac{1}{R_R}$ .

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{K_4}{K_3} \right) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

siendo:

$$K_4 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R'_w} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_R} + \frac{1}{R'_R} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_w} - \frac{1}{R'_w} \right) \cdot \left( \frac{1}{R_R} - \frac{1}{R'_R} \right) \cdot \cos 2\theta \right] \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Los valores de  $m$  y  $n$  vienen determinados por el ángulo  $\theta$ :

Tabla 2.2: Valores de  $m$  y  $n$

$\theta$	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$m$	2,731	2,397	2,136	1,926	1,754	1,611	1,486	1,378	1,284	1,202	1,128	1,061	1,000
$n$	0,493	0,530	0,567	0,604	0,641	0,678	0,717	0,759	0,802	0,846	0,893	0,944	1,000

El radio de curvatura de un cuerpo se considera positivo si el centro de curvatura correspondiente está dentro del cuerpo, como puede verse en la figura 2.30.

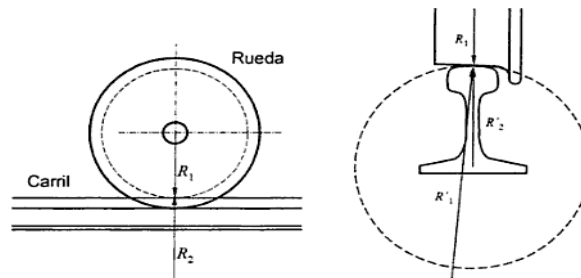


Figura 2.30: Radios de curvatura rueda-carril

Los valores de los semiejes,  $a$  y  $b$ , de la superficie de contacto dependen de la carga normal ( $N$ ) que actúa sobre ella. Para calcular el valor de esta carga es necesario conocer la distribución de presiones que se tiene en la zona de contacto, de tal manera que luego integrando esta distribución a lo largo de toda esta superficie se obtiene el valor de la carga normal ( $N$ ). La distribución de presiones es:

$$p(x, y) = p_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Conociendo la distribución de presión semi-elipsoidal y el volumen de un elipsoide, se puede obtener la carga total normal que esta actuando, en función de la presión máxima  $p_0$ .

$$N = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot p_0}{3} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

### 2.3.2. Teoría de Kalker. Problema tangencial

En 1967 [10] Kalker desarrolló una teoría en la que consideraba que la relación entre las fuerzas de contacto tangenciales y los pseudos-deslizamientos era lineal. Las relaciones lineales que Kalker establece para las fuerzas de contacto son:

$$F_x = -f_{33} \cdot \varepsilon_x \quad \text{Ecuación 2.14}$$

$$F_y = -f_{11} \cdot \varepsilon_y - f_{12} \cdot \varphi \quad \text{Ecuación 2.15}$$

$$M_z = -f_{12} \cdot \varepsilon_y - f_{22} \cdot \varphi \quad \text{Ecuación 2.16}$$

donde:

$F_x$  es la fuerza debida al pseudo-deslizamiento longitudinal.

$F_y$  es la fuerza debida al pseudo-deslizamiento lateral.

$M$  es el momento debido al pseudo-deslizamiento de giro.

$\varepsilon_x$  es el pseudo-deslizamiento longitudinal.

$\varepsilon_y$  es el pseudo-deslizamiento lateral.

$\Phi$  es el pseudo-deslizamiento de giro.

$f_{11}, f_{12}, f_{22}, f_{33}$  son los coeficientes de pseudo-deslizamiento definidos por Kalker como:

$$f_{11} = (a \cdot b) \cdot G \cdot C_{22} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

$$f_{12} = (a \cdot b)^{3/2} \cdot G \cdot C_{23} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$f_{22} = (a \cdot b)^2 \cdot G \cdot C_{33} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

$$f_{33} = (a \cdot b) \cdot G \cdot C_{11} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

donde:

$G$  es el módulo de rigidez combinado para los materiales de la rueda y el carril:

$$G = \frac{2 \cdot G_w \cdot G_R}{G_w + G_R} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

$C_{11}, C_{22}, C_{23}$  y  $C_{33}$  son los coeficientes de deslizamiento y de giro cuyos valores están tabulados y dependen únicamente del módulo de rigidez ( $G$ ) y del coeficiente de Poisson ( $\sigma$ ) combinados para los materiales de la rueda y el carril.

Tabla 2.3: Valores de coeficientes de deslizamiento y giro

$g$	$C_{11}$			$C_{22}$			$C_{23} = -C_{32}$			$C_{33}$		
	$\sigma=0$	1/4	1/2	$\sigma=0$	1/4	1/2	$\sigma=0$	1/4	1/2	$\sigma=0$	1/4	1/2
<b>(a/b)</b>												
0,1	2,51	3,31	4,85	2,51	2,52	2,53	0,334	0,473	0,731	6,42	8,28	11,7
0,2	2,59	3,37	4,81	2,59	2,63	2,66	0,483	0,603	0,809	3,46	4,27	5,66
0,3	2,68	3,44	4,80	2,68	2,75	2,81	0,607	0,715	0,889	2,49	2,96	3,72
0,4	2,78	3,53	4,82	2,78	2,88	2,98	0,720	0,823	0,977	2,02	2,32	2,77
0,5	2,88	3,62	4,83	2,88	3,01	3,14	0,82	0,929	1,07	1,74	1,93	2,22
0,6	2,98	3,72	4,91	2,98	3,14	3,31	0,930	1,03	1,18	1,56	1,68	1,86
0,7	3,09	3,81	4,97	3,09	3,28	3,48	1,03	1,14	1,29	1,43	1,50	1,60
0,8	3,19	3,91	5,05	3,19	3,41	3,65	1,13	1,25	1,40	1,34	1,37	1,42
0,9	3,29	4,01	5,12	3,29	3,54	3,82	1,23	1,36	1,51	1,27	1,27	1,27
<b>(b/a)</b>												
1,0	3,40	4,12	5,20	3,40	3,67	3,98	1,33	1,47	1,63	1,21	1,19	1,16
0,9	3,51	4,22	5,30	3,51	3,81	4,16	1,44	1,59	1,77	1,16	1,11	1,06
0,8	3,65	4,36	5,42	3,65	3,99	4,39	1,58	1,75	1,94	1,10	1,04	0,954
0,7	3,82	4,54	5,58	3,82	4,21	4,67	1,76	1,95	2,18	1,05	0,965	0,852
0,6	4,06	4,78	5,80	4,06	4,50	5,04	2,01	2,23	2,50	1,01	0,82	0,751
0,5	4,37	5,10	6,11	4,37	4,90	5,56	2,35	2,62	2,96	0,985	0,819	0,650
0,4	4,84	5,57	6,57	4,84	5,48	6,31	2,88	3,24	3,70	0,912	0,747	0,549
0,3	5,57	6,34	7,34	5,57	6,40	7,51	3,79	4,32	5,01	0,868	0,674	0,446
0,2	6,96	7,78	8,82	6,96	8,14	9,79	5,72	6,63	7,89	0,828	0,601	0,341
0,1	10,7	11,7	12,9	10,7	12,8	16,0	12,2	14,6	18,0	0,795	0,526	0,228



siendo el coeficiente de Poisson combinado:

$$\sigma = \frac{G \cdot (G_W \cdot \nu_R + G_R \cdot \nu_W)}{2 \cdot G_W \cdot G_R} \quad \text{Ecuación 2.21}$$

$G_W$  y  $G_R$  son los módulos de rigidez de los materiales de la rueda y el carril respectivamente.

$\nu_R$  y  $\nu_W$  son los coeficientes de Poisson de los materiales de la rueda y el carril respectivamente.

La teoría lineal de Kalker sólo es válida cuando los pseudo-deslizamientos longitudinal, lateral y de giro son muy pequeños. Cuando esto ocurre, la zona de deslizamiento dentro de la zona de contacto es muy pequeña y se puede suponer que el área de adhesión cubre toda la zona de contacto.

Para considerar el caso de pseudo-deslizamientos grandes, Kalker desarrolló la Teoría Exacta y lo implementó en el programa denominado CONTACT. El problema de esta teoría es que requiere mucho coste computacional. Por esta razón, Kalker desarrolló otra teoría, denominada Teoría Simplificada, y la implementó en otro programa denominado FASTSIM [12], que es la rutina utilizada por el Adams/Rail para la resolución de la zona de contacto.

### Teoría Simplificada de Kalker

La teoría simplificada de Kalker [13] se puede utilizar en el caso de que se tenga un contacto que se pueda aproximar por el modelo de Hertz y en el que los cuerpos que están en contacto sean casi-idénticos. Esta teoría tiene en cuenta la influencia del pseudo-deslizamiento longitudinal, lateral y de giro. Debido a que se considera que los cuerpos son casi idénticos, Kalker dividió el problema del contacto rueda-carril en dos:

- El problema normal, que se resuelve empleando la teoría de Hertz.
- El problema tangencial, que se resuelve empleando la teoría simplificada.

Para desarrollar la teoría simplificada, Kalker consideró que la rueda y el carril eran dos cuerpos rígidos. Modelizó la superficie de contacto entre ellos como un conjunto de muelles situados en puntos discretos de las superficies, y supuso que la superficie de desplazamiento era un único punto que dependía sólo de la tracción en su superficie.

Las fuerzas debidas a los pseudo-deslizamientos que son obtenidas con esta teoría son:

$$F_x = \frac{8 \cdot a^2 \cdot b}{3 \cdot L} \cdot \varepsilon_x \quad \text{Ecuación 2.22}$$

$$F_Y = \frac{8 \cdot a^2 \cdot b}{3 \cdot L} \cdot \varepsilon_y - \frac{\pi \cdot a^3 \cdot b}{4 \cdot L} \cdot \varphi \quad \text{Ecuación 2.23}$$

La teoría lineal de Kalker es un caso particular de la teoría simplificada.

## **2.4. Teoría del Descarrilamiento**

En la medida que evolucionaron los trenes, se ha tratado de incrementar las velocidades de tránsito de los mismos, tratando al mismo tiempo de reducir el peso muerto de las locomotoras y vagones. Pero ocurre que a medida que se reduce el peso y se aumenta la velocidad disminuye la estabilidad de marcha y la seguridad al descarrilamiento en el sistema de guiado con rieles convencionales.

La seguridad contra el descarrilamiento entonces, se convierte en un estudio muy importante para la evolución del transporte por ferrocarril. De esta manera, se ha considerado el análisis propuesto por los Ingenieros Nadal y C. Laffite [14], como la teoría del descarrilamiento, para determinar la mayor seguridad de circulación de los trenes. Se recurre entonces a métodos que proporcionaran una reducción en los efectos dinámicos en caso de accidentes, procurando así mayor seguridad y menor daño usando una concepción estructural liviana.

### **Teoría del descarrilamiento-fórmulas de Nadal y Laffite**

El análisis de la teoría del descarrilamiento y las relaciones o fórmulas de Nadal y Laffite, representan las consideraciones mínimas usadas clásicamente como criterio o definición para la seguridad de la circulación. Se pasará a explicar algunas de las consideraciones previas sobre la inscripción en curvas de los vehículos ferroviarios.

#### **El material móvil clásico en marcha**

Cuando un vehículo pasa de una alineación recta a una curva sigue la dirección rectilínea hasta que el borde de la pestaña de la rueda exterior delantera choca contra el raíl exterior obligándole a cambiar de dirección. Es ésta la llamada "posición extrema oblicua, límite de la marcha libre". Véase la figura 2.31.

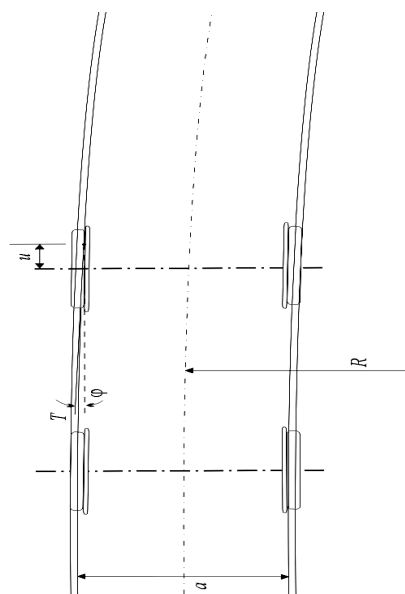


Figura 2.31: Posición extrema oblicua, límite de la marcha libre

Siguiendo su marcha en la curva, el vehículo gira sobre sí mismo adoptando posiciones comprendidas entre la anterior y una posición llamada "extrema simétrica, límite de la marcha forzada" que ocurre cuando el excedente de fuerza centrífuga lanza al eje posterior contra el carril exterior. Véase la figura 2.32.

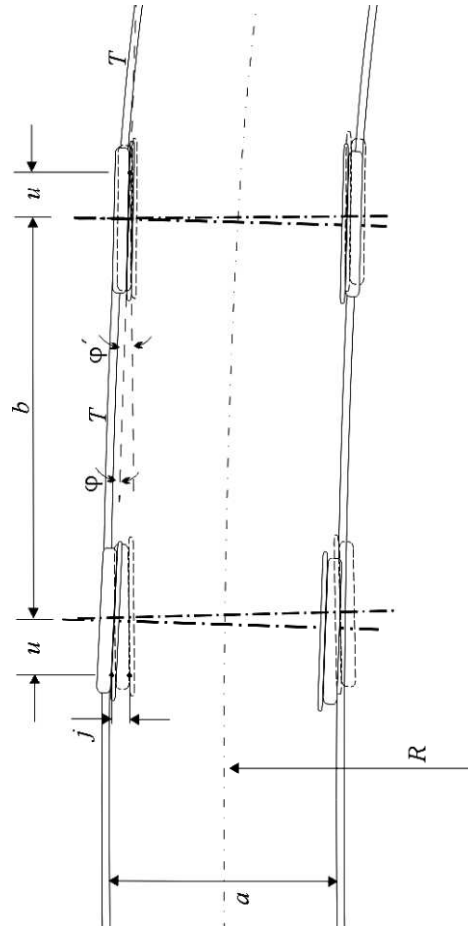


Figura 2.32: Giro del bogie hasta la posición de la extrema simétrica, límite de la marcha forzada

La posición, que se presenta en la figura 2.32, corresponde a la extrema simétrica no encajada y ocurre cuando el ángulo de ataque positivo de la rueda exterior delantera ha disminuido hasta su valor mínimo, al chocar contra el raíl exterior, gira el bogie y presiona la rueda exterior trasera contra el raíl exterior con un ángulo de ataque negativo.

Dependiendo del sobre ancho de la vía, el radio de la curva y el largo de la base rígida, por ejemplo en los vagones de dos ejes en curvas de radio reducido y sobre ancho mínimo, cabe la posición extrema simétrica encajada, límite de la marcha forzada. Véase la figura 2.33.

El estudio de la inscripción de un vehículo en curva se basa, en dos posiciones límite fundamentales:

- Posición extrema oblicua, límite de la marcha libre (Figura 2.31).
- Posición extrema simétrica, límite de la marcha forzada (Figura 2.32).

Estos casos de posición de la rueda oblicua al carril, en los que el contacto entre ambos se hace en dos puntos: uno sobre la rueda y el otro sobre el lado de la pestaña, son las situaciones más propicias al descarrilamiento.

El choque de la pestaña con el raíl, es decir, el contacto de la rueda con el mismo en dos puntos, también ocurre en el movimiento de serpenteo o lazo de los vehículos en los alineamientos rectos debido al juego u holgura entre pestañas y carriles.

Debido a dicho juego u holgura entre pestañas y carriles el par de ruedas, en su movimiento de avance, puede ocupar una posición oblicua con relación a aquellos formando con los mismos un ángulo de ataque  $\psi$ , en analogía con la circulación en curva. Véase la figura 2.34.

El movimiento de lazo aumenta con la velocidad y puede ser de gran importancia, e incluso violento, con riesgo de descarrilamiento.

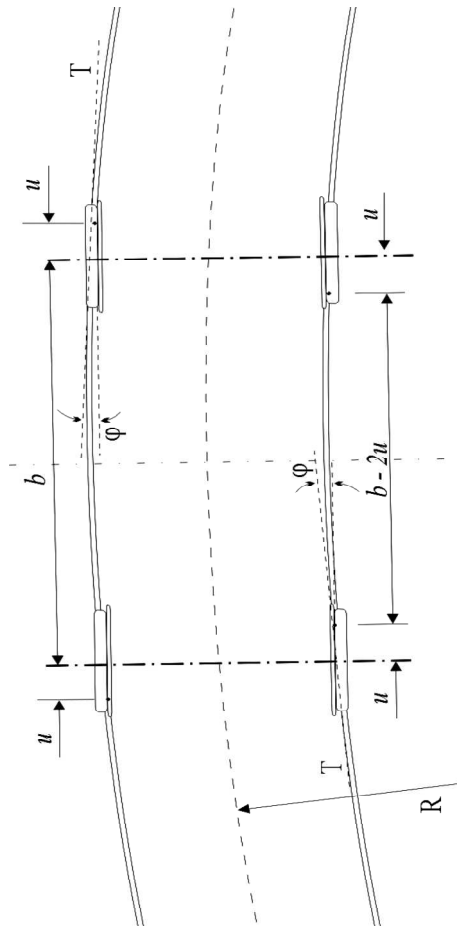


Figura 2.33: Inscripción de la rodadura en curvas posición encajada

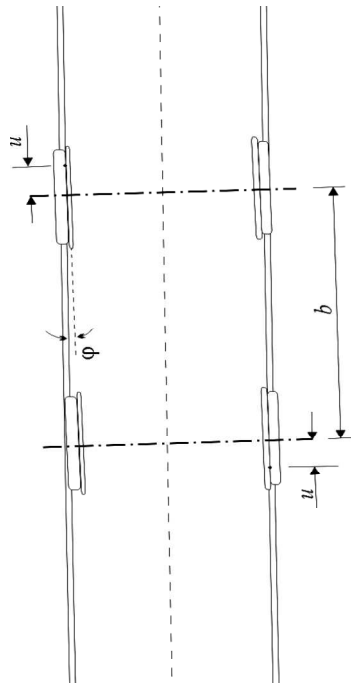


Figura 2.34: Movimiento de serpenteo o lazo

En todos estos casos de posición oblicua de la rueda al raíl, según un ángulo de ataque  $\psi$ , el contacto con éste se realiza en dos puntos, uno sobre la rueda y el otro sobre el lado de la pestaña. Si el radio del acuerdo de la pestaña es suficientemente amplio, la línea de contacto es única, tal como  $AB'$ , figura 2.36. El punto  $B'$  se aleja de  $A$  cuanto mayor es el ángulo de ataque  $\psi$  y menor la inclinación del lado de la pestaña.

Pueden existir dos líneas de contacto, por desgaste de la rueda, y cuando el radio del acuerdo de la pestaña es menor que el del raíl.

En el movimiento de rotación de la rueda, su eje instantáneo corresponde a la generatriz de contacto que pasa por el punto  $A$  y el desplazamiento de un punto de ella, tal como  $B'$ , es un arco de círculo cuyo centro está sobre esa misma generatriz.

Los puntos de esa línea de contacto, como  $B'$ , se deslizan sobre el raíl venciendo la fuerza de rozamiento originada por el empuje lateral que actúa sobre la línea de contacto de las superficies de rueda y raíl.

Mientras se produzca el deslizamiento la rueda no subirá sobre el raíl. Sin embargo, si la fuerza de rozamiento llega a un valor suficientemente grande, debido a ese empuje lateral, para que dicho deslizamiento cese, el punto  $B'$  se inmoviliza, convirtiéndose en centro instantáneo de rotación y la rueda se levanta por detrás girando alrededor de  $B'$ . Entonces, este pasa a ser el punto de aplicación de la carga  $P$  y de la resultante de las fuerzas de rozamiento horizontales de todas las ruedas del vehículo. El punto  $B'$ , que al principio se encuentra sobre el acuerdo de la pestaña, pasa así rápidamente al lado inclinado de la misma

y, a menos que el valor de  $P$  sea suficientemente grande, la rueda monta al raíl. Gráficamente esto se explica según ilustra la figura 2.35.

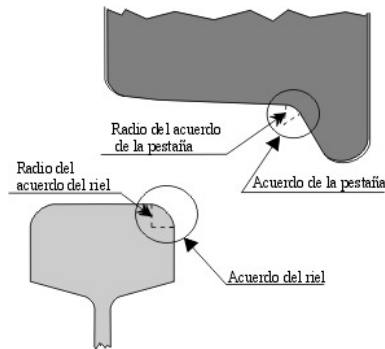


Figura 2.35: Detalle de los acuerdos de la pestaña y riel

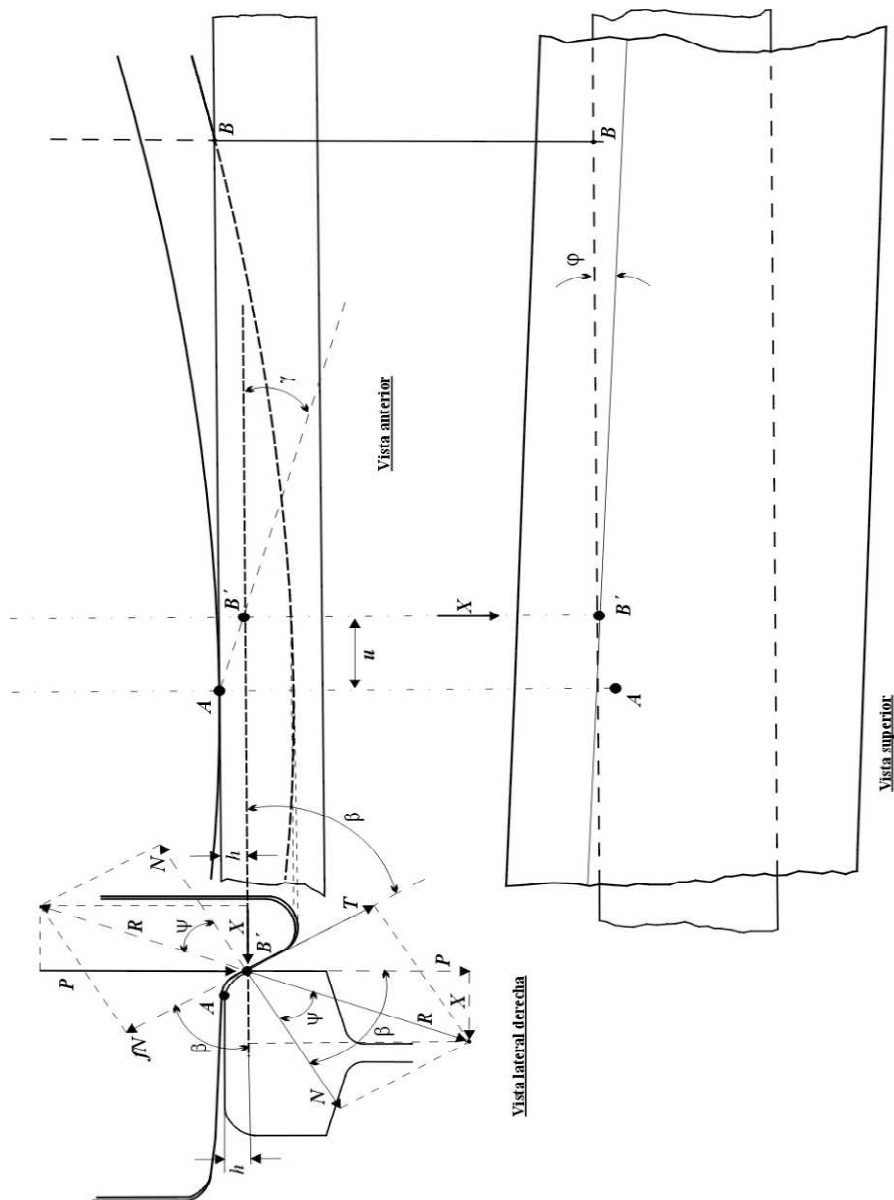


Figura 2.36: El radio del acuerdo de la pestaña es suficientemente amplio

La rueda transmite al raíl la carga  $P$  y el empuje lateral  $X$ , los cuales tienen por resultante la fuerza  $R$ . Dicha resultante  $R$  admite una componente  $N$  perpendicular al plano tangente que contiene a la generatriz de contacto rueda-raíl que pasa por el punto  $B'$  analizado, y una componente  $T$  en dicho plano tangente inclinado.

En principio la rueda, empujada por la reacción de guiado gira sobre el acuerdo de la pestaña y desliza en el plano inclinado de la misma mientras el valor de  $P$  sea suficientemente grande.

En la medida que disminuya el valor de la carga  $P$  en la rueda y/o aumente el de la fuerza  $X$ , disminuirá la componente  $T$  y aumentará  $fN$ . Al igualarse cesa el deslizamiento, inmovilizándose el punto  $B'$  que pasó al lado inclinado de la pestaña, el cual se convierte en centro instantáneo de rotación, y la rueda monta al raíl produciéndose el descarrilamiento.

En ese momento de equilibrio, antes del descarrilamiento, se cumple la siguiente relación:

$$\frac{X}{P} = \tan(\beta - \Psi) = \frac{\tan\beta - \tan\Psi}{1 \pm \tan\beta \cdot \tan\Psi} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

donde  $\Psi$  es el ángulo de rozamiento y  $\tan\Psi = f$ , el coeficiente de rozamiento rueda-carril.

Es decir:

$$\frac{X}{P} = \frac{\tan\beta - f}{1 \pm f \cdot \tan\beta} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

donde:

$$X = P \cdot \frac{\tan\beta - f}{1 \pm f \cdot \tan\beta} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

La ecuación 2.26 es la expresión que es conocida como fórmula de NADAL, que no toma en cuenta la influencia del ángulo de ataque ni el diámetro de la rueda.

La fórmula del Ingeniero español C. Laffite es, en tal sentido, más completa, como se demostrará. Como se dijo, observando la figura 2.36, el valor de  $u$  y también el de  $h$  dependen del ángulo de ataque.

El valor de  $h$  puede tomarse, en promedio, igual a 9 mm para una rueda de 840 mm a 2.000 mm de diámetro en su círculo de rodadura y para ángulos de ataque entre  $0^\circ$  y  $2^\circ$ .

El valor  $u$  queda determinado por la fórmula:

$$u = (r \pm h) \cdot \tan\beta \cdot \tan\Psi \quad \text{Ecuación 2.27}$$

Observando la figura 2.37, puede verse que la trayectoria elemental del punto B' es normal a AB' y forma un ángulo  $\gamma$  con la vertical. Por lo tanto el esfuerzo de rozamiento  $fN$  no se proyecta verticalmente sino con la inclinación  $\gamma$  y su proyección ortogonal vale:

$$fN \cdot \cos\gamma - fN \cdot \sin\gamma = fN \cdot (\cos\gamma - \sin\gamma) \quad \text{Ecuación 2.28}$$

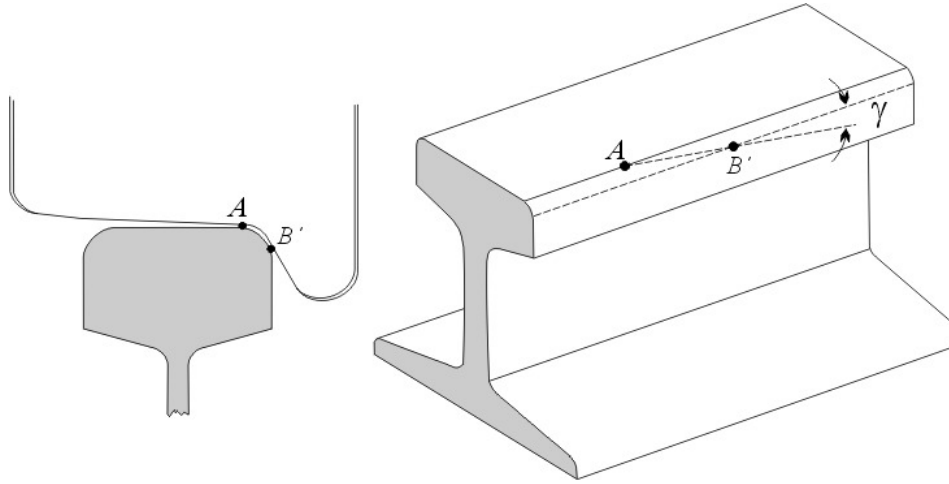


Figura 2.37: Detalle en tres dimensiones de cómo es medido el ángulo  $\gamma$

donde:

$$\cos\gamma - \sin\gamma = \frac{u-h}{\sqrt{u^2+h^2}} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

En consecuencia, la fórmula anterior se convierte en la fórmula de Laffite:

$$C_S = \frac{X}{P} = \frac{\tan\beta - f \cdot (\cos\gamma - \sin\gamma)}{1 \pm f \cdot \tan\beta \cdot (\cos\gamma - \sin\gamma)} \quad \text{Ecuación 2.30}$$

El término  $X/P$ , ha probado que constituye una eficaz medida para evaluar la seguridad del rodamiento.

El valor del ángulo de inclinación del lado de la pestaña de la rueda está comprendido entre:  $600 \leq \beta \leq 700$ .

Es decir, que prácticamente se tiene la condición de que en el material móvil clásico se necesita una carga mínima en la rueda igual o mayor que el máximo empuje lateral que pueda recibir, para evitar el riesgo de descarrilamiento:

$$C_S = \frac{X}{P} = \frac{\text{empuje lateral}}{\text{carga en la rueda}} \quad \text{Ecuación 2.31}$$



## 3. El bogie Y25

---

### 3.1. Introducción

La aplicación del bogie Y25 está dirigida explícitamente al transporte de mercancías. En la actividad de las grandes empresas ferroviarias europeas es normal que el volumen de facturación por transporte de viajeros y de mercancías sean dos sumandos de semejante orden de magnitud. Sin embargo en los Estados Unidos, las mercancías representan más de 90% de la facturación total.

Históricamente, el transporte de mercancías ha sido, y continúa siendo, una parte importante de la razón de ser del ferrocarril [15], en la que se ponen de manifiesto algunas de las cualidades esenciales de la vía férrea: su capacidad para transmitir al terreno grandes cargas, el aprovechamiento del espacio y la independencia respecto a otros modos.

La participación del ferrocarril en los mercados nacionales de mercancías, ha sido muy importante en el centro de Europa y en gran medida el ferrocarril se estableció para apoyar la industria pesada europea. Aún en 1950, el transporte por ferrocarril representaba el 60% de las Tn-Km transportadas en Alemania y el 40% de las transportadas en Francia. En España, por la diferente posición de la industria, menos pesada y más dispersa respecto del ferrocarril, la participación de este en el transporte de mercancías fue siempre menor, pero aun así en 1950 era próxima al 40%.

Como el caso del transporte de viajeros, la competencia de la carretera fue mermando la participación del ferrocarril en el transporte de mercancías, llegándose en los años 80, a cifras medias de penetración en el mercado comprendidas entre el 20 y el 35% y más bajas en España, ya que a finales de los años 80 esta participación era solamente del orden del 8%. Pero estas cifras no reflejan tampoco la verdadera posibilidad del ferrocarril, cuando se trata de mercancías de pesos y volúmenes importantes, orígenes y destinos concentrados y con buena accesibilidad al ferrocarril.

Aún en un territorio no muy favorable, si se dan o se potencian las condiciones idóneas, la presencia del ferrocarril en el transporte de mercancías continua siendo significativa.

Por otra parte, para una serie de productos pesados o de gran volumen como los productos siderúrgicos y minerales, los carbones o determinados productos químicos, la existencia del ferrocarril puede ser determinante para la viabilidad de las mercancías, que por razones de capacidad o de seguridad difícilmente pueden utilizar medios alternativos, excepto el transporte por tubería o el de cabotaje, cuando ello es posible.

El uso del contenedor, que hace posible un transporte intermodal, puede potenciar, en ciertas relaciones, el transporte ferroviario de mercancías.

En este sentido, se desarrollan sistemas mixtos de transporte de mercancías, ferrocarril-carretera, más avanzados que el contenedor. Uno de ellos por ejemplo consiste en unos semirremolques debidamente reforzados, que circulan por carretera arrastrados por un tractor, y al llegar a una terminal ferroviaria, se apoyan por sus extremos sobre bogies de ferrocarril, pudiéndose formar así trenes arrastrados por una locomotora.

De esta forma el propio vehículo de mercancías realiza una parte del recorrido, que corresponde al tramo de mayor demanda de tráfico, como semirremolque de un vehículo tractor de carretera, aprovechando así, en los distintos tramos de su recorrido, las ventajas básicas de ambos medios de transporte. Naturalmente ello tiene sus limitaciones que no permiten utilizar este proceso en cualquier relación de transporte de mercancías.

Conviene asimismo, destacar la importante función que cumple el transporte de mercancías por ferrocarril en la seguridad global del sistema de transportes. Por un lado en cuanto a su función en el transporte de mercancías peligrosas, en el que la participación de la carretera debe limitarse al mínimo imprescindible y en este sentido se están orientando las normas internacionales. Por otro, en los accidentes mortales que se producen en la carretera, los vehículos pesados están implicados en notable proporción, lo que es una indicación de que cualquier transferencia de transporte de mercancías desde la carretera al ferrocarril podría reducir los niveles de peligrosidad en el conjunto del transporte.

El bogie Y25, ilustrado en la figura 3.1, está destinado para el transporte de mercancías, y se caracteriza porque solo tiene suspensión primaria. Dispone de un bastidor, dos pares de resortes en cada caja de grasa como suspensión primaria, se trata de dos resortes en paralelo, uno para hacer frente al comportamiento en vacío del vagón y otro cuando éste está cargado, el funcionamiento es el siguiente: el segundo resorte tiene una holgura de 10 mm con respecto al primero, de manera que cuando el primero sobrepasa esta medida, actúan los dos resortes en paralelo.

Posee un amortiguador de fricción Lenoir que permite la amortiguación vertical y lateral. El soporte central tiene una superficie esférica con el fin de reducir las fuerzas asimétricas en el bastidor y en los bastidores elásticos laterales sin que la holgura soporte los movimientos de balanceo de la carrocería.



Figura 3.1: Bogie Y25

Las figuras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 muestran los planos del alzado, de la planta, del soporte central y de la caja de grasa junto a la suspensión primaria, respectivamente.

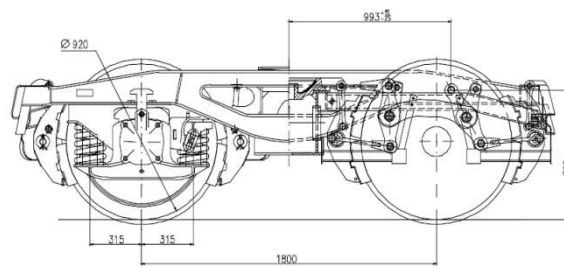


Figura 3.2: Alzado Y25

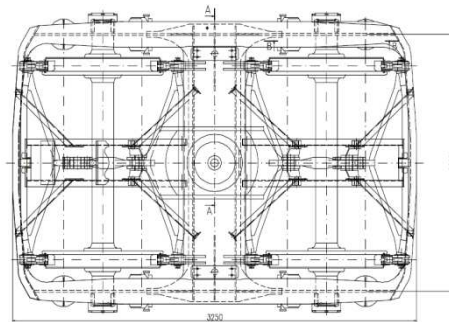


Figura 3.3: Planta Y25

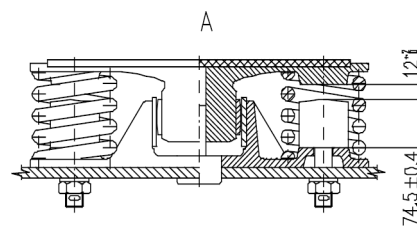


Figura 3.4: Soporte central de superficie esférica

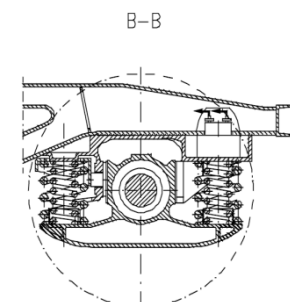


Figura 3.5: Caja de grasa y suspensión primaria

### 3.2. Datos técnicos del bogie Y25

Para llevar a cabo las simulaciones deseadas mediante Adams/Raíl, es necesario definir las propiedades físicas y geométricas de cada uno de los componentes que constituyen el sistema general [16]. Las propiedades físicas se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1: Características físicas del bogie Y25

Cuerpo	M (kg)	$I_{xx}$ (kg·m <sup>2</sup> )	$I_{yy}$ (kg·m <sup>2</sup> )	$I_{zz}$ (kg·m <sup>2</sup> )	Cog (m)
½ Vagón	40.000	47.500	510000	500.500	1,87
Bogie	2.220	1.975	1560	2.850	0,7
Caja de grasa	20	5	5	5	0,42
Soportes laterales	25	10	10	10	0,84
Eje montado	1.300	688	100	688	0,42

- Distancia circunferencial del eje montado = 1,5 m
- Radio de rodadura = 0,42 m
- El vagón está separado en dos cuerpos rígidos con el centro de gravedad a +/- 4,815 m a lo largo del eje X y unidos entre sí mediante una unión de revolución, caracterizada por una rigidez a torsión de 10,5 MN/m.
- La masa e inercia de los soportes laterales puede ser modificada según el peso del vagón.

Las propiedades geométricas y longitudinales son:

- Distancia entre ejes = 1.8 m
- Espacio entre los pivotes de los bogies = 15.7m
- Precarga total secundaria = 392240 N
- Precarga secundaria en los soportes laterales(x2) = 19282 N
- Precarga secundaria en la posición central = 353676 N
- Precarga de la suspensión primaria (total) = 103625 N por lado
- Precarga de la suspensión primaria en carga = 37450 N por tope de la suspensión
- Precarga de la suspensión primaria tarada = 14362.55 N por resorte
- Carga estática en eje (~22 T) = 220390 N por eje
- Carga estática en rueda = 100195 N por rueda

### 3.3. Amortiguador de fricción Lenoir

El amortiguador de fricción Lenoir es un sistema de amortiguación que consiste en solapar las caras de la caja de grasa con las del cuerpo del bogie provocando superficies de fricción tanto en la dirección vertical como horizontal, es decir, en el plano YZ [17].

La representación de la fuerza de rozamiento, figura 3.6, sigue la clásica ley de Coulumb, a menudo esta fórmula conduce a problemas de simulación numérica, debido a la discontinuidad introducida por el comportamiento de la fuerza de fricción.

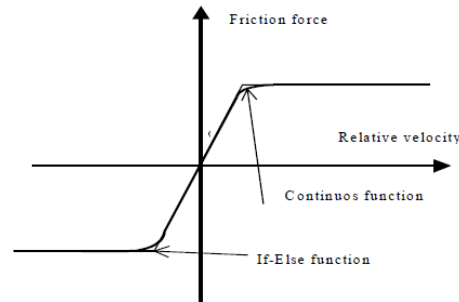


Figura 3.6: Representación de la función continua de la fuerza de rozamiento

Para evitar este problema, las fuerzas de fricción han sido modeladas con una función continua, *velocidad relativa vs fricción de las caras*, descritas por la siguiente ecuación:

$$F_f = \frac{V \cdot \chi}{\sqrt{1 + \left(\frac{V \cdot \chi}{N \cdot \mu}\right)^2}} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde:

$F_f$  = Fuerza de fricción.

$V$  = Velocidad media.

$\chi$  = Tangente al origen de la función de transferencia fuerza/velocidad.

$\mu$  = coeficiente de rozamiento.

En el caso de los Y25 las superficies de fricción, figura 3.7, permiten el movimiento relativo en el plano que incluye la dirección vertical y lateral, por lo que es necesario ampliar la formulación de la fuerza de fricción de dos grados de libertad.

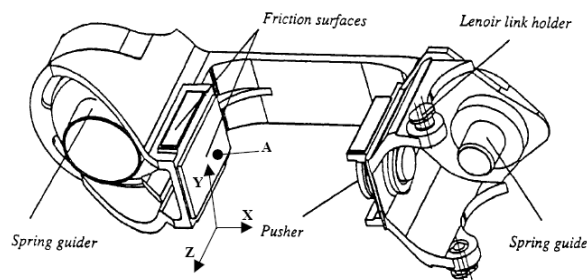


Figura 3.7: Representación de las caras de fricción

Las dos componentes de la velocidad vertical y lateral son  $\dot{z}$  e  $\dot{y}$ , y el valor absoluto de la velocidad es:

$$V = \sqrt{\dot{z}^2 + \dot{y}^2} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

donde:

$$\dot{z} = V \cdot \cos \theta \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$\dot{y} = V \cdot \sin \theta \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Por tanto, las componentes de la fuerza de fricción, figura 3.8, en las direcciones z e y son:

$$F_{f,z} = F_f \cdot \cos \theta = \frac{V \cdot \chi \cdot \cos \theta}{\sqrt{1 + \left(\frac{V \cdot \chi}{N \cdot \mu}\right)^2}} = \frac{\chi \cdot \dot{z}}{\sqrt{1 + \left(\frac{V \cdot \chi}{N \cdot \mu}\right)^2}} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$F_{f,y} = F_f \cdot \sin \theta = \frac{V \cdot \chi \cdot \sin \theta}{\sqrt{1 + \left(\frac{V \cdot \chi}{N \cdot \mu}\right)^2}} = \frac{\chi \cdot \dot{y}}{\sqrt{1 + \left(\frac{V \cdot \chi}{N \cdot \mu}\right)^2}} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

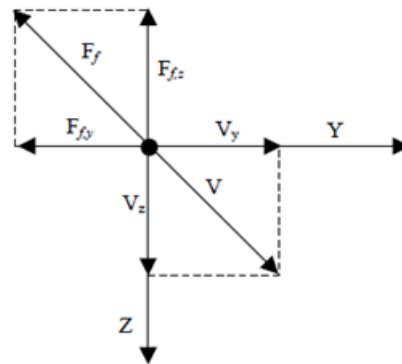


Figura 3.8: Componentes de la fuerza de fricción en el plano ZY

### **3.4. Adaptación del bogie Y25 al programa Adams/Rail**

Adams es una solución que posibilita realizar la simulación del movimiento del vehículo de forma que permite analizar el complejo comportamiento de un ensamblaje mecánico. Permite además, crear prototipos virtuales y optimizar así los diseños, consiguiendo un mejor funcionamiento, una mayor seguridad y un mayor confort sin necesidad de construir físicamente estos prototipos.

Adams es una familia de software interactivo para la simulación del movimiento que incluye varios módulos especializados orientados a diferentes sectores industriales como son la aeronáutica, motores, ferrocarriles, automóviles, etc.

El paquete básico, que incluye Adams/View, Adams/solver y Adams/PostProcessor, permite importar la mayoría de las geometrías realizadas con los sistemas CAD más importantes y construir sistemas sólidos del modelo mecánico que se quieran analizar. Dispone de una amplia librería formada por elementos individuales y ensamblajes que posibilitan crear sistemas mecánicos articulados. Una vez creado el prototipo virtual, Adams lo comprueba y permite realizar simulaciones cinemáticas, estáticas, cuasiestáticas y dinámicas mostrando los resultados en forma de gráficos, diagramas de datos, informes y animaciones. Los diferentes módulos que aparecen en el paquete son: Adams/Aircraft, Adams/Engine, Adams/Car, Adams/Hydraulics y Adams/Rail.

Adams/Rail es el programa con el que se ha llevado a cabo el estudio, este software permite crear y ensamblar las distintas partes de las que se compone un tren y someter a análisis el sujeto diseñado obteniendo multitud de parámetros previamente solicitados como pueden ser ángulos de ataque, desplazamientos laterales y verticales, velocidades longitudinales, laterales y verticales, las fuerzas de contacto en las tres direcciones, elipses de contacto, el coeficiente de descarrilamiento, etc.

Se ha de destacar que este programa utiliza las teorías de Kalker para modelar el contacto rueda-carril. El programa considera que las ruedas no tienen movimiento vertical, por lo que durante todo el proceso de la simulación el contacto entre el carril y las ruedas es constante.

### 3.4.1. Modelado de los elementos en Adams/Rail

#### 3.4.1.1. Modelo detallado de la caja de grasa en Adams/Rail

En el bogie Y25, la amortiguación de movimiento vertical está dada por un dispositivo mecánico situado en la suspensión primaria llamado Lenoir Link [12], que utiliza una parte del peso del vagón para soportar la carga normal a las superficies de fricción, por lo que la amortiguación vertical también es sensible a la carga. La suspensión secundaria se reduce a un pivote central, con una rigidez muy alta, y la amortiguación se consigue mediante una pareja de soportes laterales, dos superficies de fricción montadas al exterior del pivote del bogie y precargado con muelles, por lo tanto, dos tipos de elementos fricción están presentes en el vehículo y ambos son sensibles a la carga. El modelo detallado para Adams/Rail de la caja de grasa se describe en la figura 3.9.

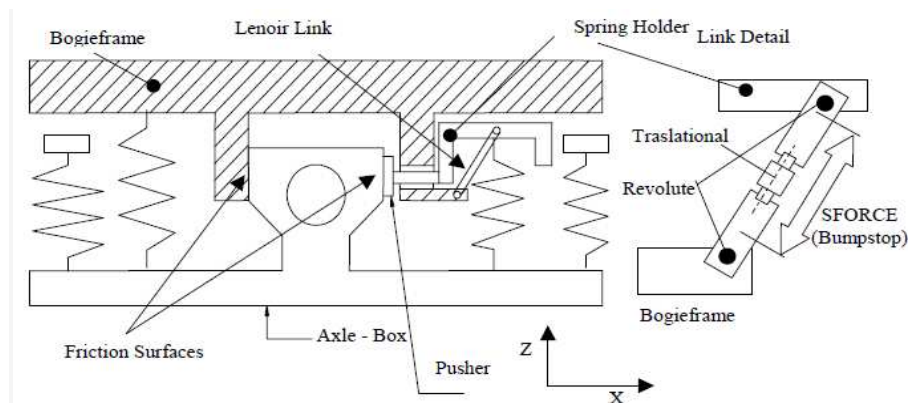


Figura 3.9: Modelo detallado de la caja de grasa

El modelo se descompone en siete partes:

- *Bastidor*: se conecta a través de las articulaciones, que sólo permiten el movimiento vertical (Z).

- *Amortiguador Lenoir Link*: se ha construido como dos partes separadas, una vinculada al bastidor y la otra al resorte, ambos con dos articulaciones de revolución. Por consiguiente, cuando aparece una fuerza en la sujeción del resorte, proveniente del mismo, los dos

elementos que une el amortiguador de fricción Lenoir se alejan, de modo que la fuerza es transferida al bogie.

-*Sujeción del resorte*: su finalidad es mantener al resorte en su posición. Está conectado al amortiguador Lenoir que está en una posición inclinada provocando que la fuerza esté compuesta por dos vectores en los ejes X y Z. De este modo, la fuerza se transmite al empujador simplificándola en la dirección X.

-*Empujador*: está conectado al bastidor mediante traslación en la dirección X. La otra parte del empujador está conectada a la caja de grasa y dispone de una cara que es la superficie de fricción.

-*Caja de grasa*: posee una superficie de fricción, cuyas fuerzas se dan en el plano Y-Z y cuyos valores están descritos anteriormente.

-*Eje montado*: está encajado en la caja de grasa mediante rodamientos y tiene unos topes laterales para simular la amortiguación de los golpes laterales.

Todos los elementos de tope han sido modelados con una rigidez en torno a  $1 \cdot 10^8$  N/m.

Debido a la complejidad existente en el amortiguador de fricción Lenoir, los tiempos computacionales que se podrían obtener con el Adams/Rail serían muy altos, por lo que es aconsejable simplificar al máximo el bogie, para posteriormente añadir las ecuaciones necesarias para simular la existencia de la conexión Lenoir, por lo tanto, se ha simplificado el sistema mediante una función de transferencia introducida entre el eje y la caja de grasa.

El bogie Y25 que se ha utilizado como objeto de estudio en la versión para Adams/Rail se muestra en la figura 3.10.

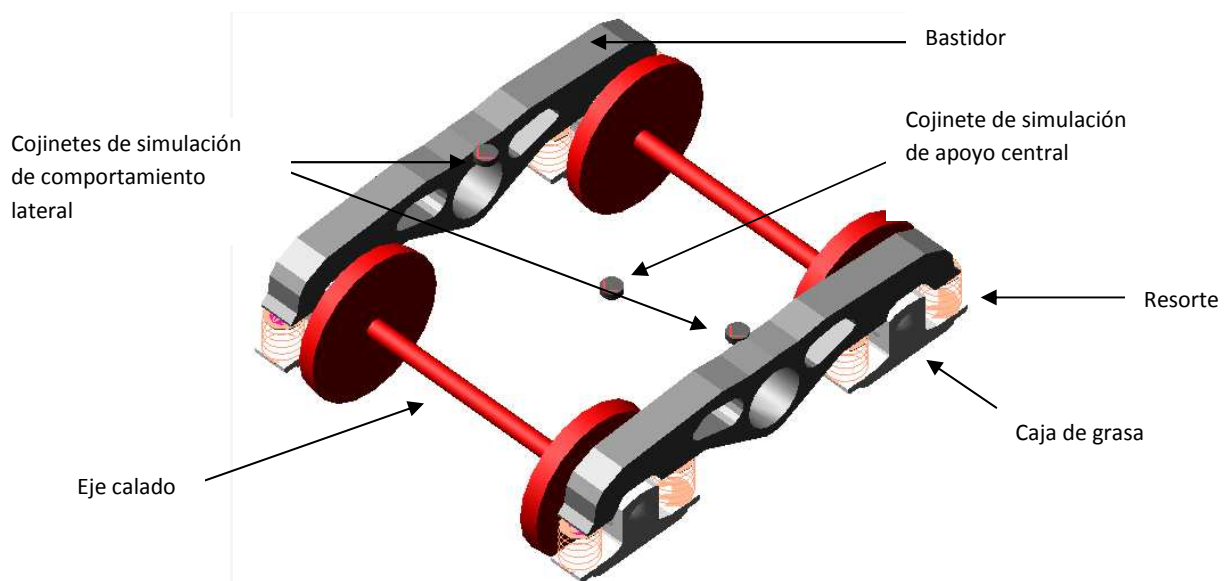


Figura 3.10: Bogie Y25 en Adams/Rail



### 3.4.1.2 Suspensión

El prototipo de bogie Y25 para Adams/Rail tiene tres grupos de suspensión:

- **Suspensión primaria**

La suspensión primaria en el bogie Y25 está compuesta por dos muelles en paralelo situados a cada lado de la caja de grasa. Para simplificar el mecanismo, se ha modelado en el Adams/Rail un resorte helicoidal con la misma rigidez que los dos en paralelo. El resorte y sus propiedades se muestran en la figura 3.11.

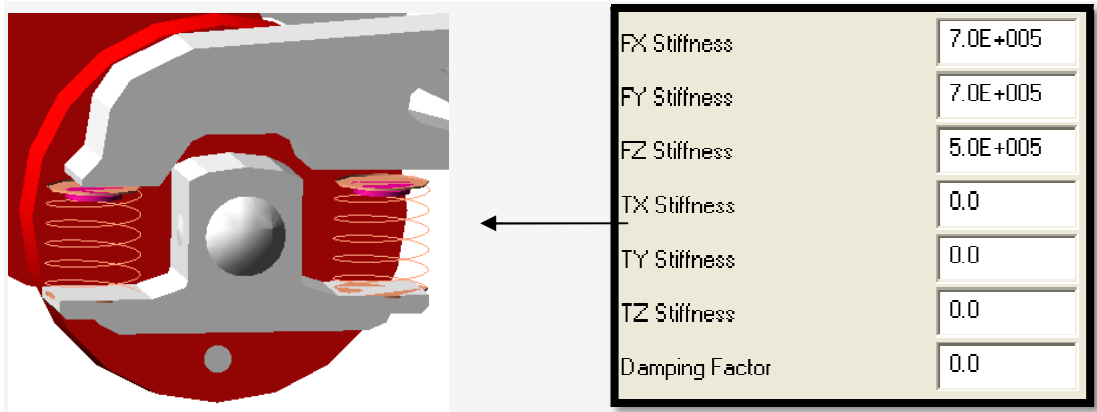


Figura 3.11: Constantes de rigidez de la suspensión primaria

Las unidades de los valores de la rigidez elástica son N/m y son los establecidos por defecto. Estos parámetros son objeto de variabilidad para situar al vagón en situaciones extremas de análisis.

- **Topes del eje**

A cada lado del eje calado hay un tope caracterizado por un *bumpstop* (en la figura 3.12 representado en color rosa) en Adams/Rail con su correspondiente rigidez (figura 3.13).

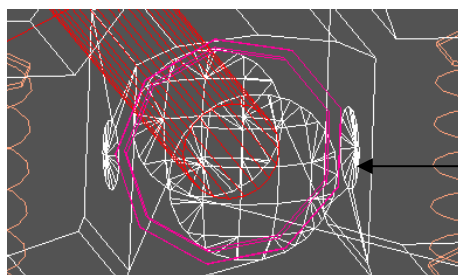


Figura 3.12: Pivote central

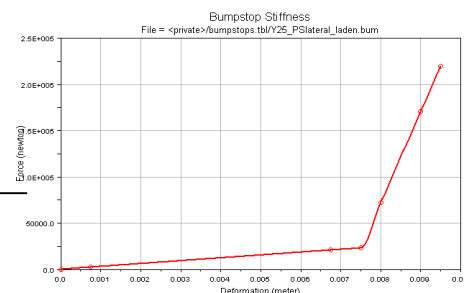


Figura 3.13: Rigidez elástica del pivote

El pivote central rota en los tres ejes direccionales y está modelado por un tope que da soporte a la unión del bogie con la caja. En la figura 3.14, se muestra el comportamiento de este tope (las tres componentes X, Y, Z, están superpuestas).

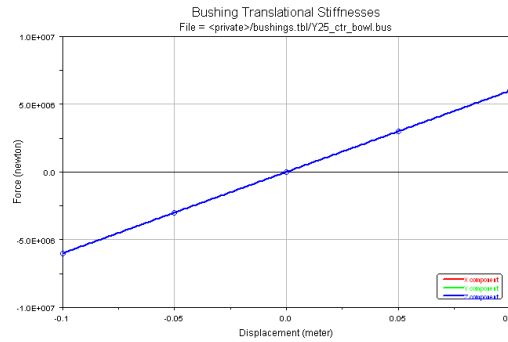


Figura 3.14: Comportamiento Fuerza vs Desplazamiento pivote central

- **Pivotes laterales**

Su movimiento de rotación está restringido al igual que su movimiento en el plano XY con respecto a la caja, su comportamiento se observa en la figura 3.15.

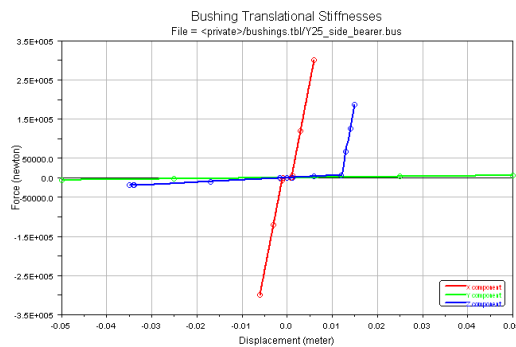


Figura 3.15: Comportamiento Fuerza vs Desplazamiento pivote lateral

### 3.4.1.3. Modelado de la rueda

El perfil de la rueda del Y25 es el llamado “P8”, representado en la figura 3.16, ha sido introducido desde un archivo txt, también ha sido introducido el modulo de Young y el coeficiente Poisson de la rueda.

Modulo de Young =  $2.1 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>

Coficiente Poisson = 0.27

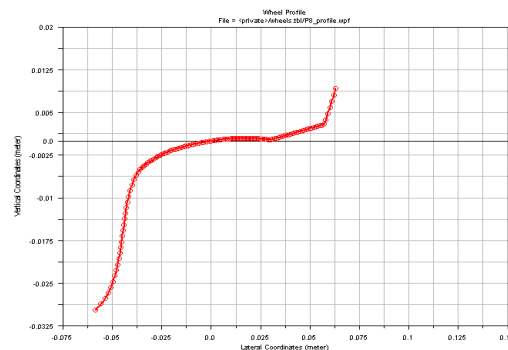


Figura 3.16: Perfil “P8” de la rueda

### 3.4.2. Construcción y ensamblado

Al abrir el programa Adams/Rail lo primero que pregunta es si se desea abrir el modo de trabajo *Standard Interface* o el *Template Builder* (figura 3.17).

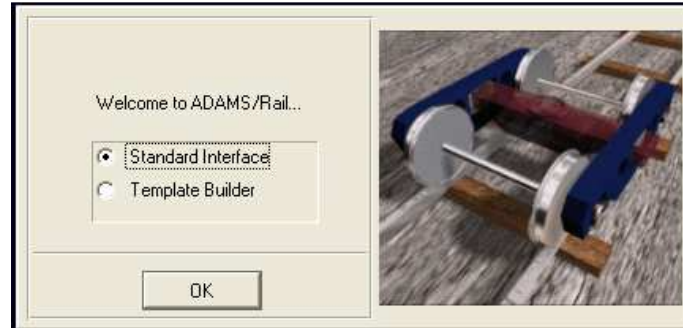


Figura 3.17: modos de trabajo

#### 3.4.2.1. TemplateBuilder

En el *Template Builder* se puede generar cualquier elemento del que está compuesto el tren como pueden ser partes genéricas, cajas de grasa, bastidores, ruedas, ejes, resortes, resortes neumáticos, amortiguadores, barras de torsión, muelles de fricción, amortiguadores de fricción, topes, vagones, juntas, etc. y también introducir sus características de masa y geométricas.

En este caso, ya se dispone previamente de un modelo de bogie Y25 y de caja proveniente de un programa de diseño CAD que ha sido convertido al Adams/Rail manteniendo sus características físicas y geométricas.

Ha sido necesario vincular en este modo el cojinete que simula la unión del bogie con la caja.

A partir de este modo *Template Builder*, se crea el miembro como ente único en formato *tpl*. con el que luego se podrá tratar para ensamblarle en el modo *Standard Interface*. Los miembros que se han sacado son un ejemplar de bogie Y25, *\_Y25.tpl* (figura 3.18) y otro de caja *\_Y25wagon\_laden.tpl* (figura 3.19).

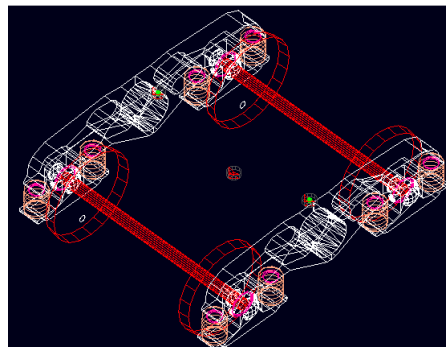


Figura 3.18: *\_Y25.tpl*

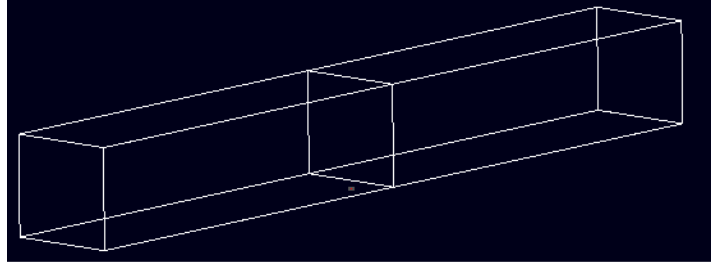


Figura 3.19: \_Y25wagon\_laden.tpl

#### 3.4.2.2. Standard Interface

La función *Standard Interface* es en la que se crean los subsistemas, se ensamblan y se ejecutan los análisis. Lo primero que se hizo fue transformar el anterior ejemplar \_Y25.tpl en subsistemas y definir suposiciones en el vagón, uno en la parte delantera y otro en la trasera. Se transformó el ejemplar de caja \_Y25wagon\_laden.tpl en un subsistema que ya venía con un cojinete con una rigidez torsional en el centro que permitía una cierta flexibilidad al vagón. De modo que se tenía los tres subsistemas necesarios para el ensamblaje:

La caja: está dividida en dos estructuras o “*General Part*” unidas por un cojinete que simula la unión de éstas caracterizada por una rigidez a torsión.

Bogie delantero: cuyo atributo para denominarlo en Adams/Rail es “front\_bogie”.

Bogie trasero: cuyo atributo para denominarlo en Adams/Rail es “rear\_bogie”.

Tras estos pasos, el siguiente fue unir todos los subsistemas en un ensamblado en el apartado de *WagonAssembly* (figura 3.20) de manera que ya se tenía el conjunto al completo.

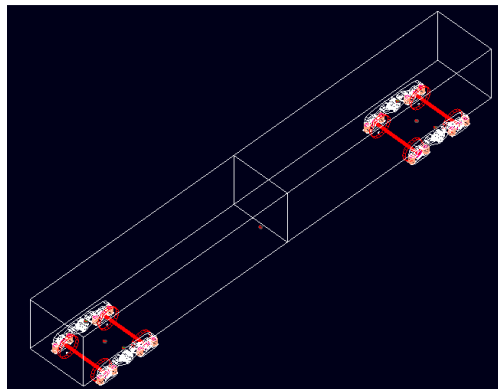


Figura 3.20: Ensamblado del conjunto caja-bogieY25

El estudio se realiza para todo el conjunto *WagonAssembly* compuesto por la caja, el bogie delantero y el bogie trasero.

Las propiedades de los elementos del bogie podían ser modificadas en este modo, de tal manera que no era necesario volver a crear un archivo nuevo en el *Template Builder* para variar los parámetros.

## 4. Resultados de simulación

En este capítulo, se explican los parámetros que influyen en el coeficiente de descarrilamiento y que, por tanto, han sido sujeto de variaciones durante el estudio. Se explica en qué medida se ha variado cada parámetro y se exponen los resultados obtenidos del coeficiente de descarrilamiento bajo dichas condiciones.

### 4.1. Criterios de variación de parámetros

El objetivo es el estudio de la variación del coeficiente de descarrilamiento del vagón de tren con bogies Y25 con respecto a la modificación de una serie de parámetros. Estos parámetros en principio se consideraban influyentes en el riesgo de descarrilamiento del tren y son los siguientes:

- **Rigidez de torsión de la caja:** modelizada por un resorte con rigidez torsional cuya gráfica representativa se muestra en la figura 4.1.

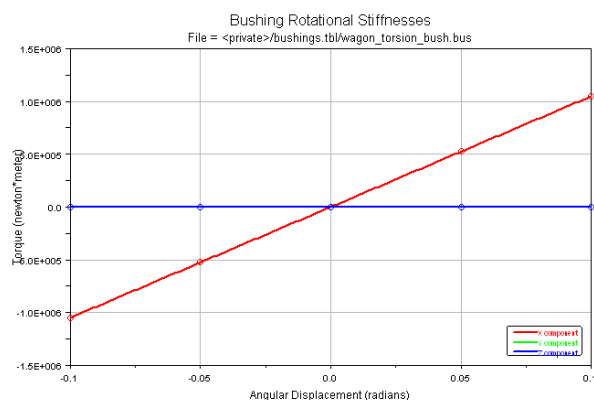


Figura 4.1: Rigidez torsional de la caja

La ventana de las propiedades del cojinete de torsión se muestra en la figura 4.2 y el valor de este parámetro se varía modificando el *property file* característico del resorte que se muestra en la figura 4.3 sustituyéndolo por el valor deseado.

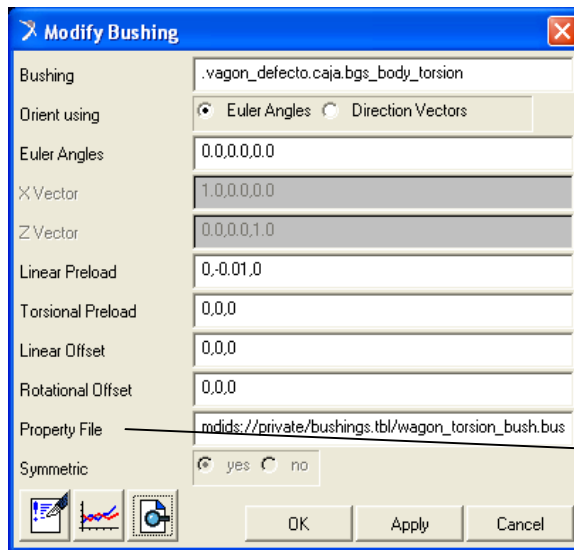


Figura 4.2: Propiedades del cojinete de torsión

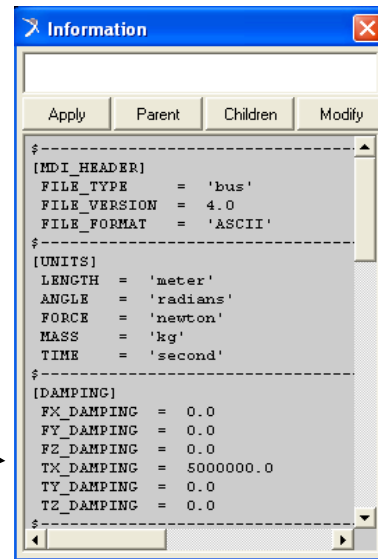


Figura 4.3: *Property file* característico del resorte

El valor de la rigidez torsional de la caja se varió en órdenes del doble y la mitad del valor por defecto, y el coeficiente de descarrilamiento no se veía afectado, por lo que este parámetro se descartó para incluir en el estudio.

- **Momento de inercia de la caja:** el valor de los momentos se introducen en sus respectivos recuadros (figura 4.4), los valores por defecto son:

$$I_{xx} = 4,75 \cdot 10^4 \text{ kgm}^2$$

$$I_{yy} = 5,1 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$$

$$I_{zz} = 5,005 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$$

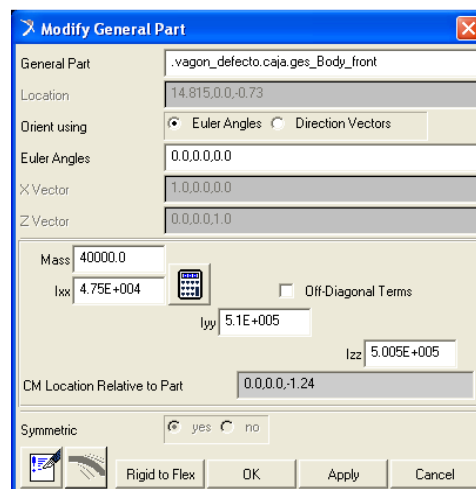


Figura 4.4: Propiedades de la caja

Se realizaron análisis con los valores de los momentos de inercia de la caja modificados en orden de diez veces mayor y diez veces menor su valor y no se apreciaron diferencias en el coeficiente de descarrilamiento, por lo que este parámetro también fue descartado para incluir en el estudio.

- **Suspensión de los resortes del bogie:** la suspensión de los resortes se modificaban a través de un *property file* característico de la suspensión (figura 4.6) predefinido con anterioridad con los valores por defecto, al que se accedía mediante la ventana de modificación de los resortes de suspensión (figura 4.5). Los valores son:  $F_x = 700.000 \text{ N/m}$ ,  $F_y = 700.000 \text{ N/m}$  y  $F_z = 500.000 \text{ N/m}$  y las modificaciones de sus valores para el estudio fueron:

- $F_x = 300.000 \text{ N/m}$   $F_y = 300.000 \text{ N/m}$ ,  $F_z = 100.000 \text{ N/m}$  y
- $F_x = 1.100.000 \text{ N/m}$   $F_y = 1.100.000 \text{ N/m}$ ,  $F_z = 900.000 \text{ N/m}$ .

Estas modificaciones fueron influyentes en la variación del coeficiente de descarrilamiento.

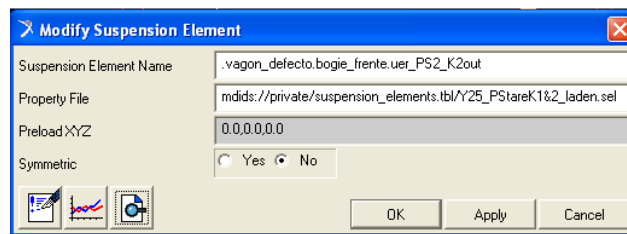


Figura 4.5: Ventana de modificación de los resortes de suspensión

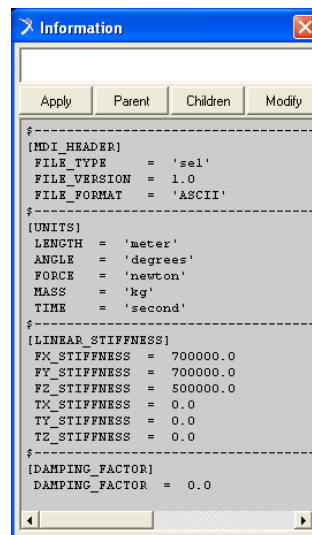


Figura 4.6: Propiedades del resorte

- **Masa de la caja:** la masa de la caja se modifica introduciendo el valor deseado en su recuadro que es el mismo que en el que aparecen los momentos de inercia (figura 4.3). Se han realizado análisis con valores de masa de 4000 kg, 20000 kg y 40000 kg para cada  $\frac{1}{2}$  vagón, apreciándose variaciones considerables en el coeficiente de descarrilamiento.

- **Velocidad del vagón:** la velocidad se introduce en la ventana de simulación *Dynamics Analysis* que es el cuadro donde se introducen los datos para comenzar una simulación. Se han

realizado estudios con los siguientes valores de velocidad: 30 m/s, 35 m/s, 40 m/s, 45 m/s y 50 m/s, apreciándose claramente que es uno de los factores que más influyen en la variabilidad del coeficiente de descarrilamiento. En este apartado, se ha de reflejar que las velocidades máximas en línea recta de los trenes de mercancías comprenden un rango entre 120 km/h y 140 km/h, pero en este estudio se ha decidido incluir valores más altos hasta 50 m/s = 180 km/h como posibles situaciones críticas que se puede dar por cualquier circunstancia.

- **Radio de la curva:** este parámetro ha de ser introducido en el cuadro *Dynamics Analysis* (figura 4.7) a través de un archivo externo en el *Track Property File* (figura 4.8). Se han tratado radios de curvatura de 500 m, 400 m y 300 m. En realidad, el mínimo radio de curvatura se establece en función de la velocidad que se predice a la que marchará el tren en cuestión. Los valores sometidos a estudios son muy pequeños, no obstante, se pueden dar situaciones reales en estas condiciones. Los cuatro tipos de trayectoria comienzan con una recta, siguen con la correspondiente curva a derechas y acaba con una recta.

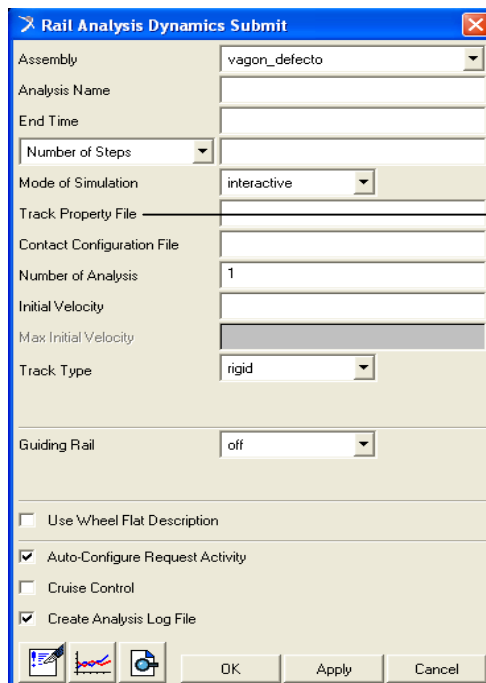


Figura 4.7: Ventana de análisis

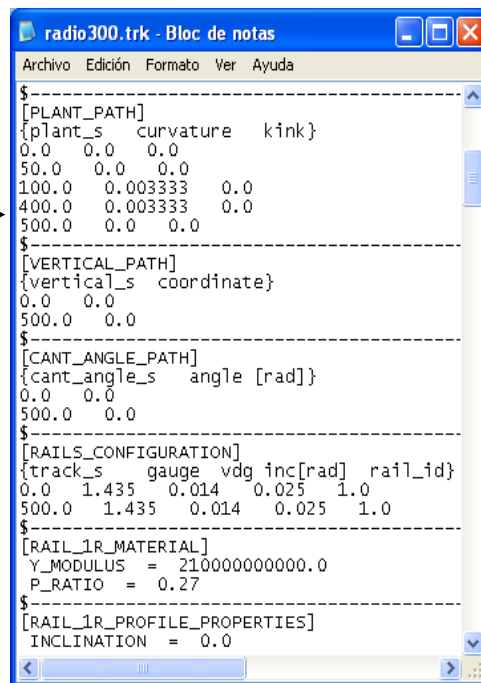


Figura 4.8: Track Property File

## 4.2 Resultados obtenidos

Según Laffite el coeficiente de descarrilamiento se define como el cociente de la fuerza lateral de la rueda entre la fuerza vertical de la rueda como se expresa en la ecuación 2.31.

Para que no ocurra el descarrilamiento se tiene que cumplir que:

$$\text{empuje lateral} \leq \text{carga en la rueda},$$

o lo que es lo mismo:

$$X \leq P.$$



En el momento que el cociente de estos dos valores sea mayor que 1 significará que la fuerza lateral será más grande que la fuerza vertical y se producirá el descarrilamiento.

A continuación se presentan todas las gráficas extraídas del programa Adams/Rail de todas las combinaciones de variables. Para cada una de las combinaciones se muestran las graficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coeficiente de descarrilamiento vs tiempo”.

En todas las gráficas se representan ocho líneas, cada una de éstas corresponde a una rueda en concreto. La localización de las ruedas se representa en la figura 4.9.

- Ues\_wst\_2\_w1l...\_rear = rueda izq./externa delantera del segundo bogie → 1
- - Ues\_wst\_2\_w1l...\_front = rueda izq./externa delantera del primer bogie → 2
- Ues\_wst\_2\_w1r...\_rear = rueda dcha./interna delantera del segundo bogie → 3
- - Ues\_wst\_2\_w1r...\_front = rueda dcha./interna delantera del primer bogie → 4
- Ues\_wst\_2\_w2l...\_rear = rueda izq./externa trasera del segundo bogie → 5
- - Ues\_wst\_2\_w2l...\_front = rueda izq./externa trasera del primer bogie → 6
- Ues\_wst\_2\_w2r...\_rear = rueda dcha./interna trasera del segundo bogie → 7
- - Ues\_wst\_2\_w2r...\_front = rueda dcha./interna trasera del primer bogie → 8

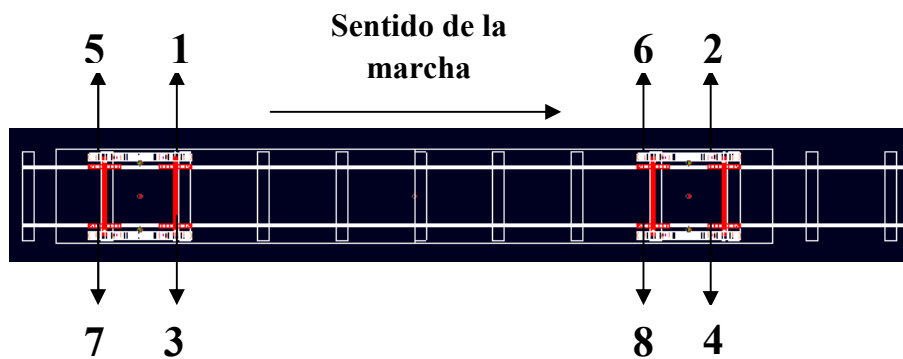


Figura 4.9: Localización de ruedas y sentido de la marcha

En la figura 4.10 se muestra un ejemplo del vagón circulando por la curva en un análisis.

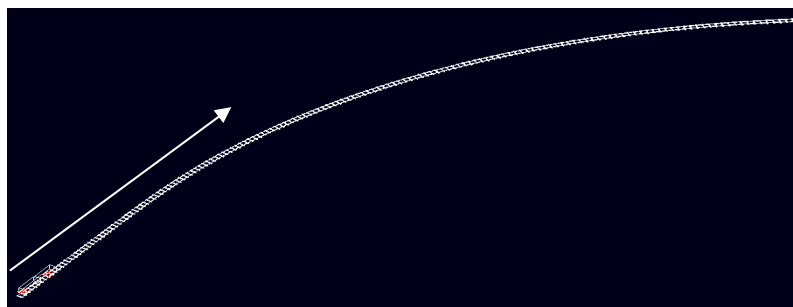


Figura 4.10: Ejemplo del tren circulando por una curva

Análisis 1

En la tabla 4.1 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 1 y en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.1: Características del análisis 1

Radio de la curva (m)	300	K (N/m)	100.000
Masa (kg)	4000	Velocidad (m/s)	30

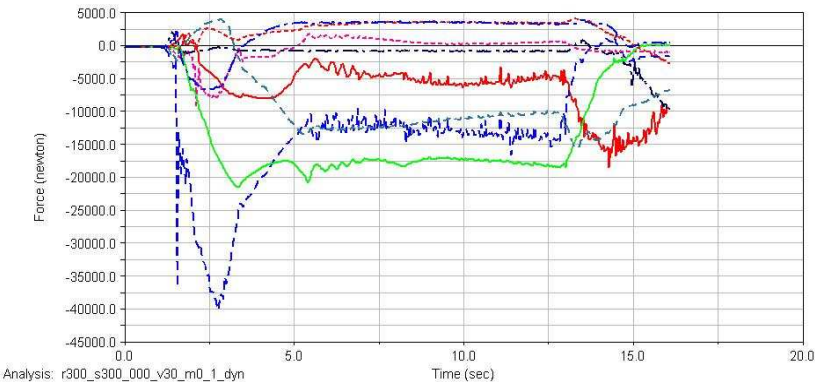


Figura 4.11: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

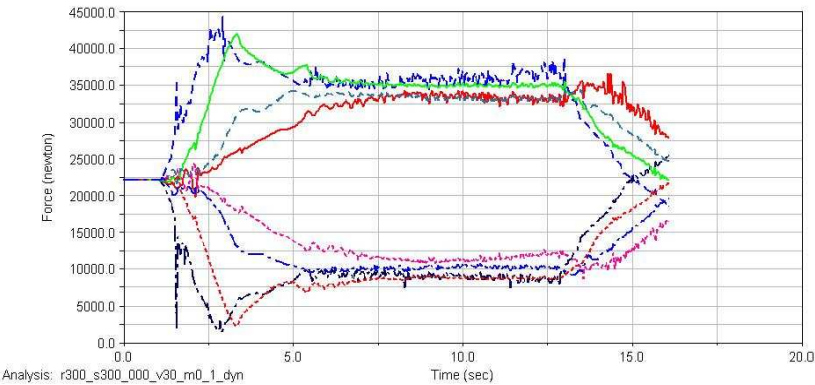


Figura 4.12: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

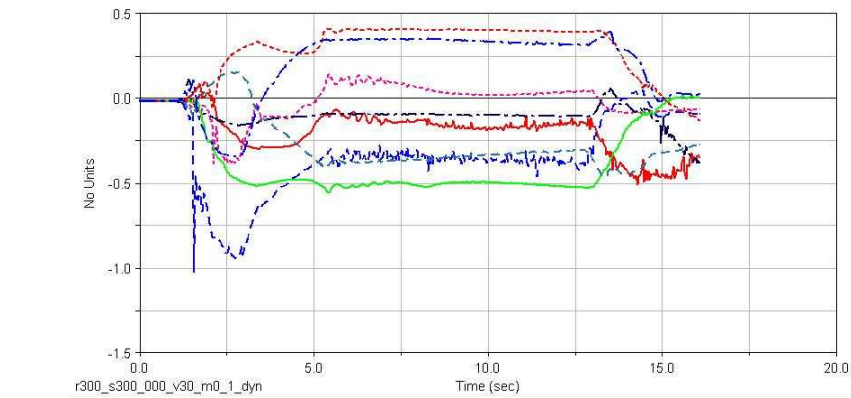


Figura 4.13: Coef. Desc.  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

La rueda externa delantera del primer bogie (2) obtiene un coeficiente de descarrilamiento de 1.028 al entrar en la curva provocado por una gran concentración de empuje lateral en dicha rueda como se puede observar en la figura 4.11. El valor del coeficiente de descarrilamiento es mayor que 1 pero la rueda no se sale del carril porque las demás no sufren descarrilamiento. En el transcurso de la curva, dicha rueda no sufre tanta fuerza lateral siendo la rueda externa trasera del segundo bogie (5) la que obtiene una mayor concentración de la fuerza lateral lo que provoca un mayor coeficiente de descarrilamiento, siendo éste 0.51. En la recta final, los coeficientes de las ruedas tienden a 0 ya que van disminuyendo las fuerzas laterales excepto la rueda interna delantera del primer bogie (4) y la rueda externa delantera del primer bogie (1) que sufren un incremento de las fuerzas laterales antes de estabilizarse en la recta final.

Análisis 2

En la tabla 4.2 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 2 y en las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.2: Características del análisis 2

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

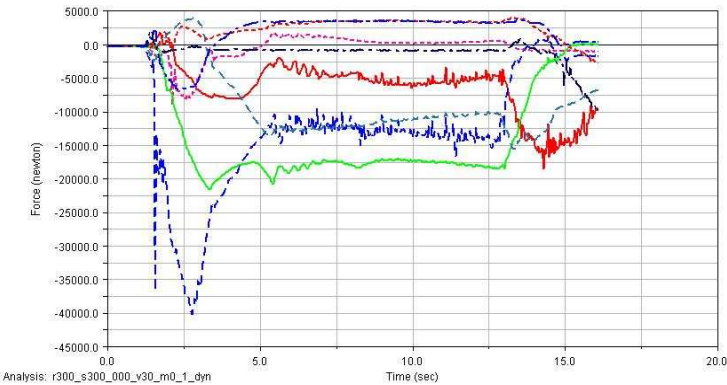


Figura 4.14: Fuerza lateral r=300m; k=100000N/m; m=4000kg; v=35m/s

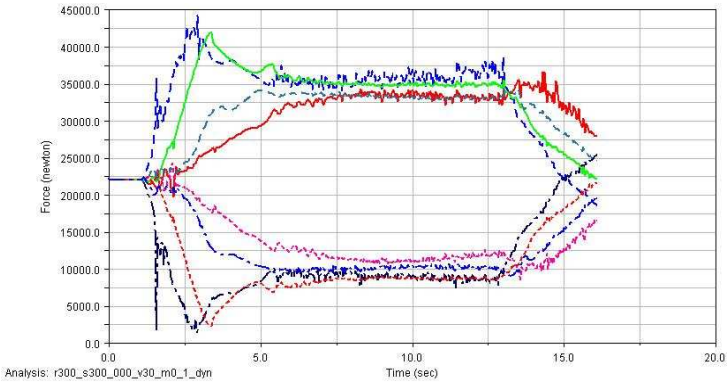


Figura 4.15: Fuerza vertical r=300m; k=100000N/m; m=4000kg; v=35m/s

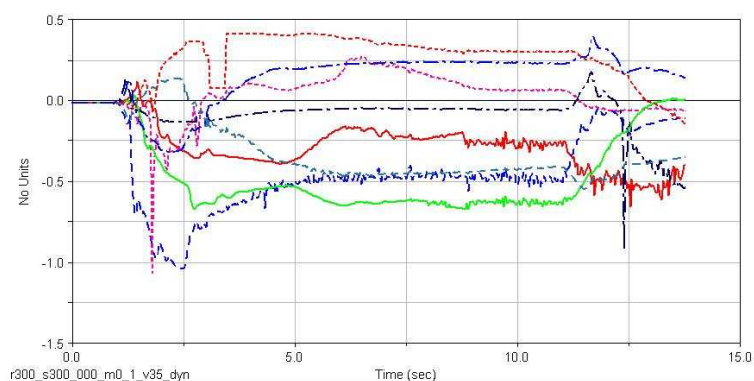


Figura 4.16: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 2, el coeficiente de descarrilamiento de la rueda interna delantera del segundo bogie (3) llega hasta 1.067 en un pequeño espacio de tiempo al entrar en la curva, estabilizándose rápidamente porque ninguna otra rueda sufre descarrilamiento en ese instante. Para el resto de ruedas, se puede considerar que su comportamiento es el mismo que en el análisis 1 pero siendo sus valores de coeficiente de descarrilamiento mayores. La rueda externa delantera del primer bogie (2) obtiene un valor máximo de 1.042 y la rueda externa trasera del segundo bogie (5) obtiene un valor de 0.67 en el transcurso de la curva.

### Análisis 3

En la tabla 4.3 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 3 y en las figuras 4.17, 4.18 y 4.19 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.3: Características del análisis 3

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

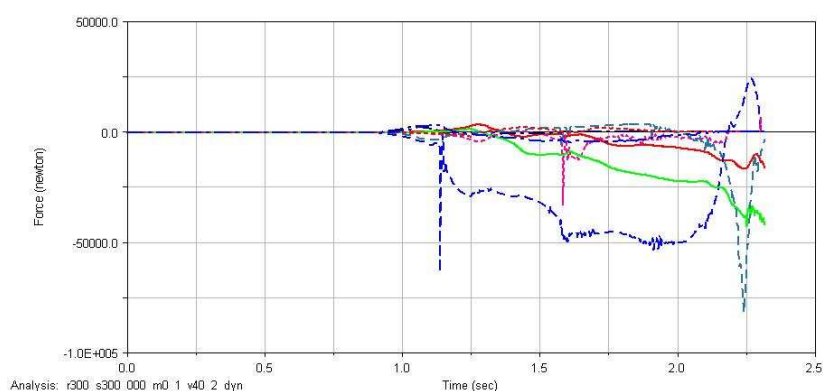


Figura 4.17: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=300000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

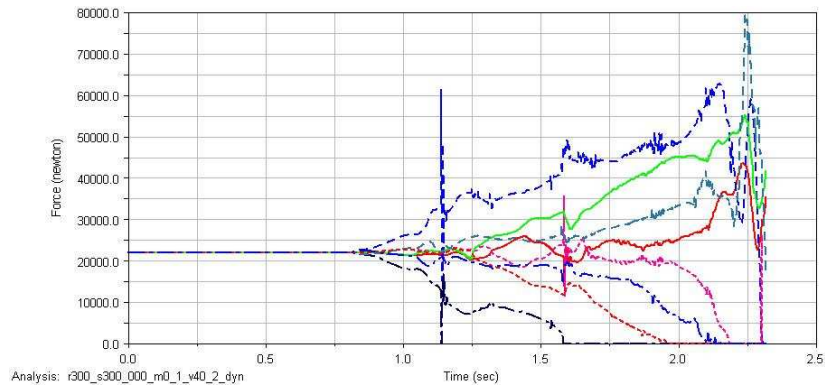


Figura 4.18: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=300000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

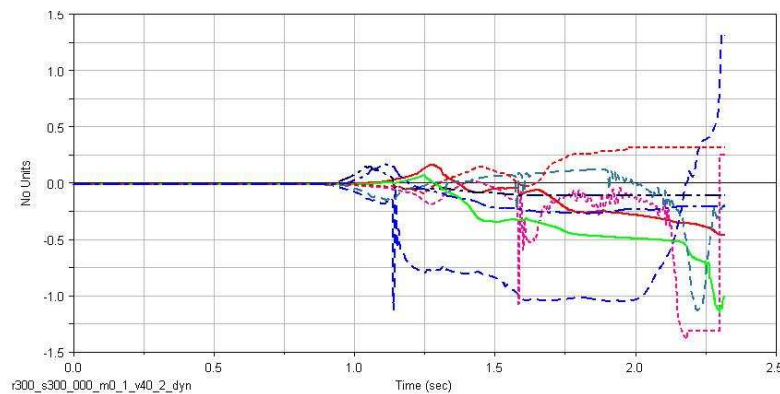


Figura 4.19: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=300000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 3, en el segundo 1.58, la rueda externa delantera del primer bogie (2) obtiene un coeficiente de descarrilamiento de 1.02 y la rueda interna delantera del primer bogie (4) deja de tener de contacto con el carril como se puede apreciar en la figura 4.18. Del mismo modo, la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el segundo 2.2 obtiene un valor de coeficiente de descarrilamiento de 1.03 al mismo tiempo que la rueda interna trasera del primer bogie (8) deja de tener contacto con el carril. De tal manera que el primer bogie descarrila saliéndose de la vía. En la figura 4.20 se aprecia, en una vista en planta, como las ruedas se salen de sus carriles y el primer bogie queda fuera de la vía.

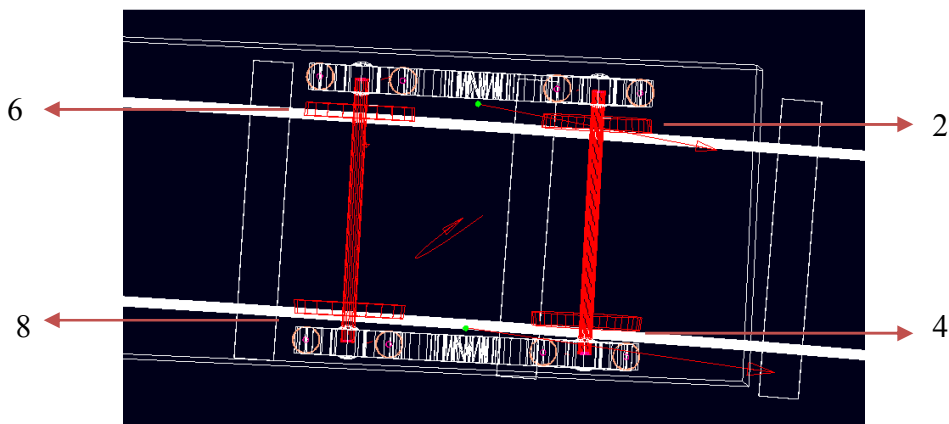


Figura 4.20: Descarrilamiento en el análisis 3

### Análisis 4

En la tabla 4.4 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 4 y en las figuras 4.21, 4.22 y 4.23 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.4: Características del análisis 4

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

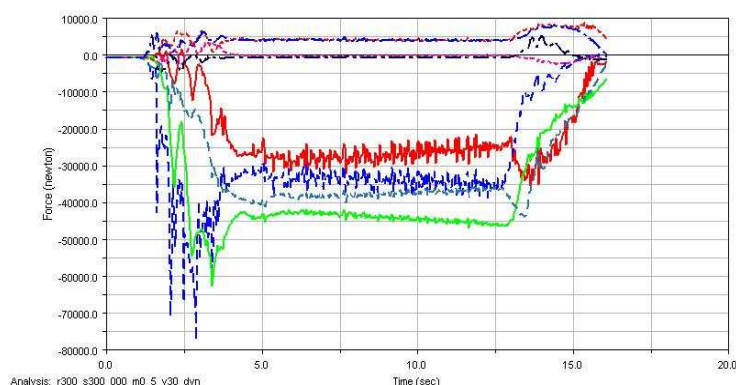


Figura 4.21: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

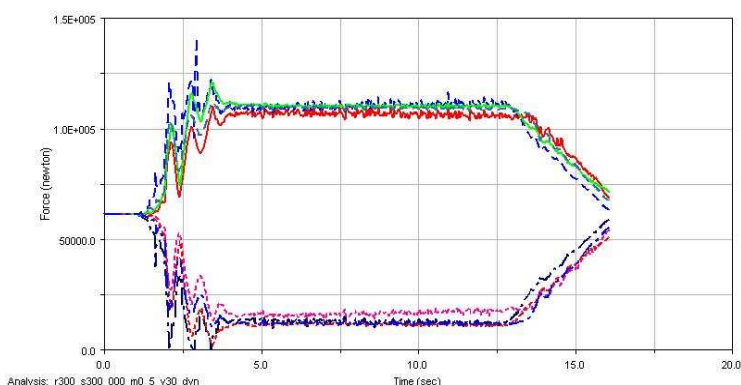


Figura 4.22: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

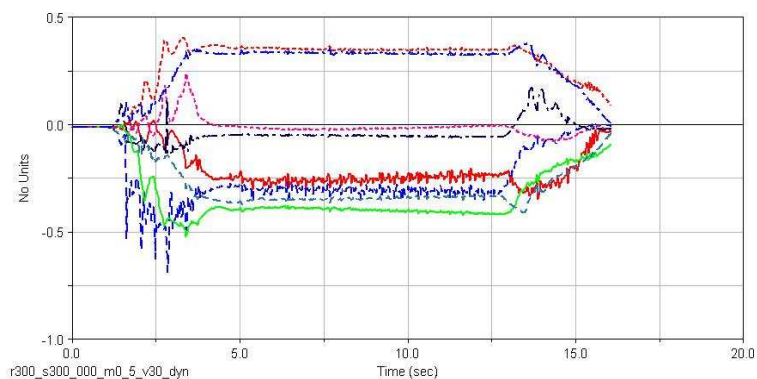


Figura 4.23: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

En el análisis 4, como se puede observar en la figura 4.23, la rueda externa delantera del primer bogie (2) obtiene un coeficiente de descarrilamiento de 0.68 al entrar en la curva, y en el transcurso, sigue siendo la rueda externa trasera del segundo bogie (5) la que sufre un mayor coeficiente de descarrilamiento siendo éste 0.41. El comportamiento de las ruedas es el mismo que en el análisis 1.

#### Análisis 5

En la tabla 4.5 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 5 y en las figuras 4.24, 4.25 y 4.26 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.5: Características del análisis 5

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

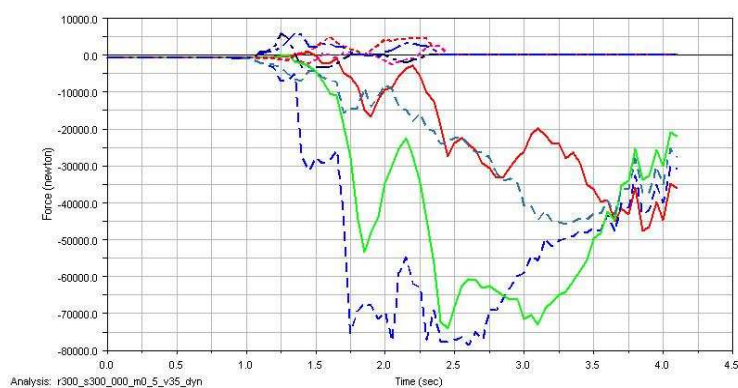


Figura 4.24: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

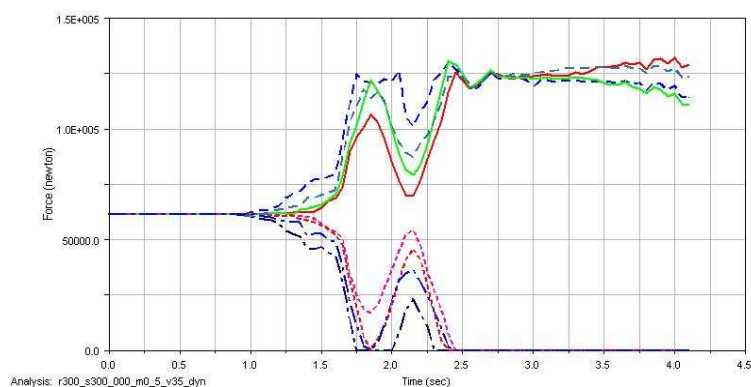


Figura 4.25: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$



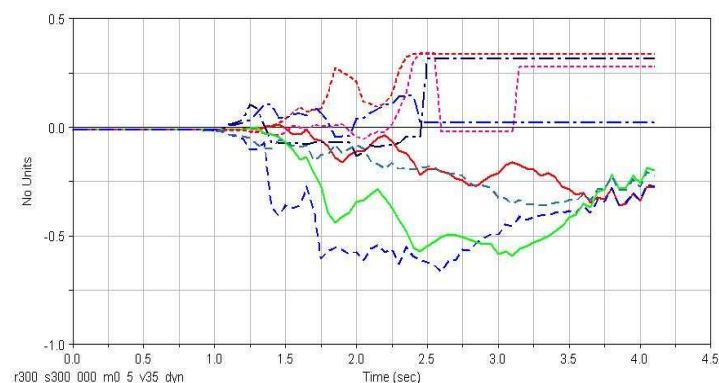


Figura 4.26: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 5 se produce el vuelco del vagón. Como se puede observar en la figura 4.25, en el segundo 1.75 la rueda interna delantera del primer bogie (4) deja de tener contacto con el carril durante 0.25 segundos, luego se incorpora de nuevo y finalmente en el segundo 2.3 se separa del carril permanentemente, sucesivamente se separan las ruedas interna trasera del segundo bogie (7), interna trasera del primer bogie (8) e interna delantera del segundo bogie (3). En la figura 4.27 se muestra como se produce el vuelco total del vagón.

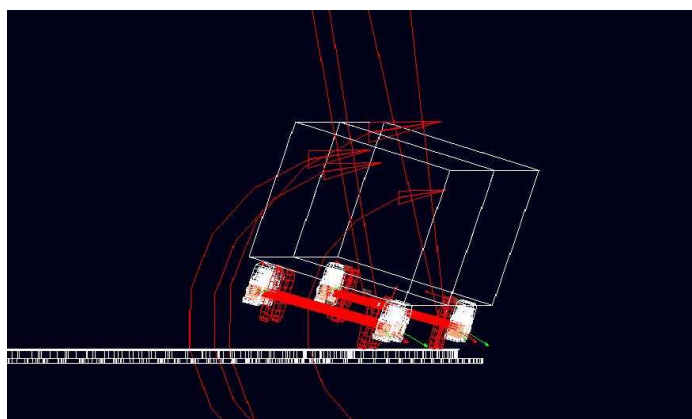


Figura 4.27: Vuelco del vagón

### Análisis 6

En la tabla 4.6 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 6 y en las figuras 4.28, 4.29 y 4.30 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.6: Características del análisis 6

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30



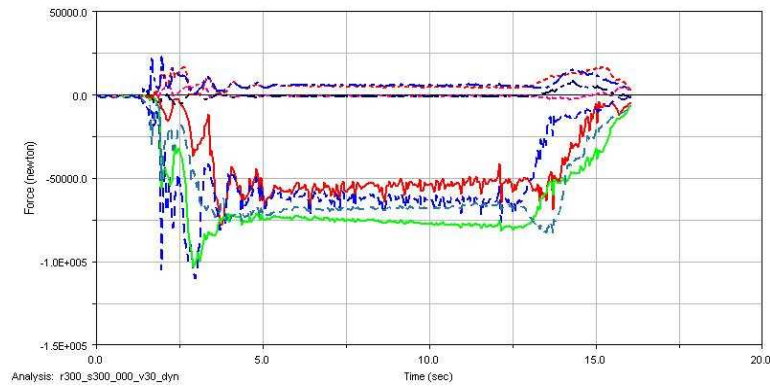


Figura 4.28: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

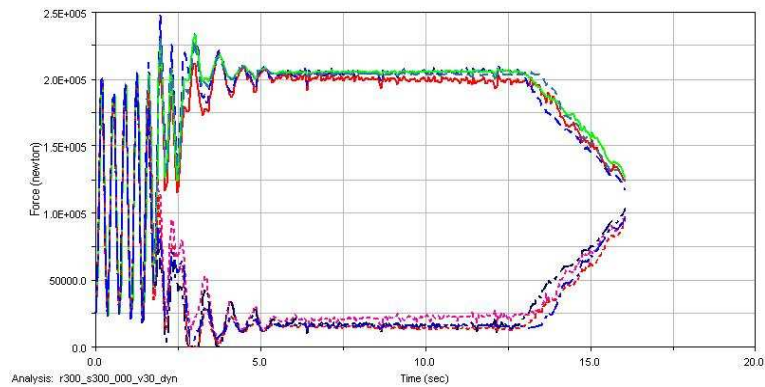


Figura 4.29: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

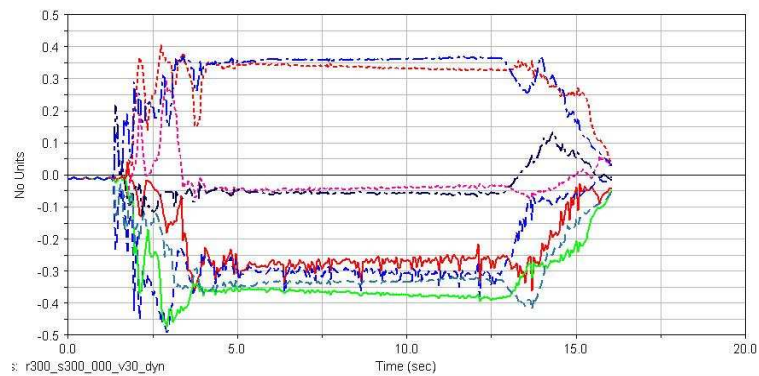


Figura 4.30: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

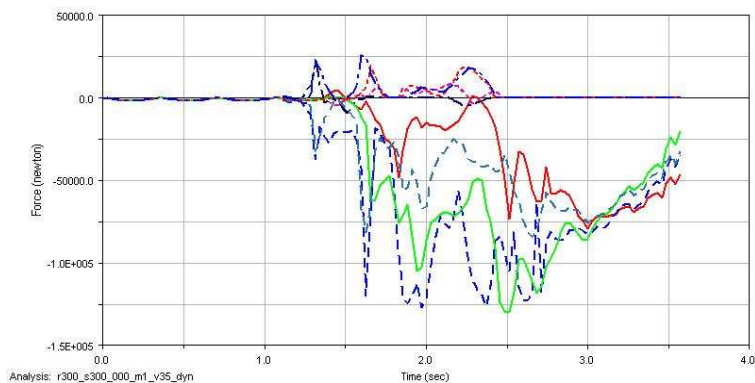
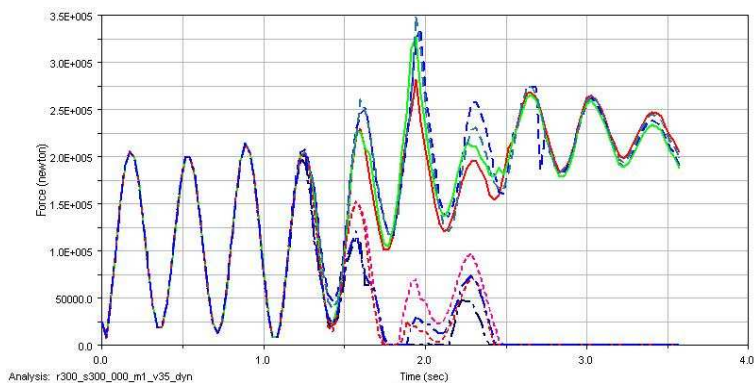
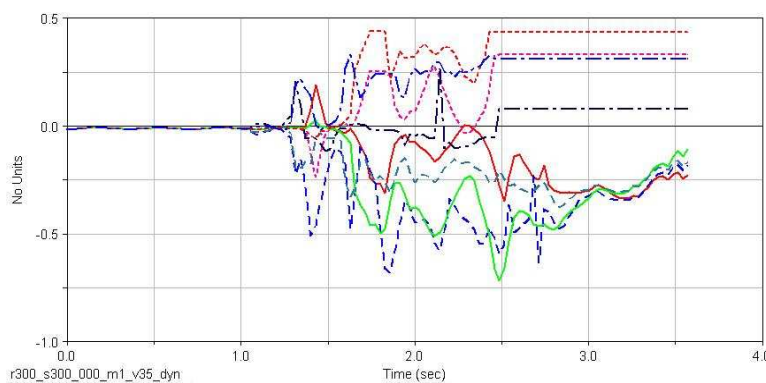
En el análisis 6 se obtiene un coeficiente de descarrilamiento máximo de 0.49 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) al entrar en la curva, y un valor máximo de 0.39 para la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 7

En la tabla 4.7 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 7 y en las figuras 4.31, 4.32 y 4.33 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.7: Características del análisis 7

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

Figura 4.31: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ Figura 4.32: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ Figura 4.33: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ 

En el análisis 7, el vagón vuelca. En el segundo 1.71 las cuatro ruedas internas dejan de tener contacto con el carril como se puede observar en la figura 4.32, en el segundo 1.9 vuelven a recuperar el contacto todas las ruedas menos la rueda interna delantera del primer bogie (4), la cual recupera el contacto con el carril en el segundo 2.2, en el segundo 2.42 todas

las ruedas internas vuelven a perder el contacto con el carril permanentemente en el mismo orden que en el análisis 5.

### Análisis 8

En la tabla 4.8 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 8 y en las figuras 4.34, 4.35 y 4.36 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.8: Características del análisis 8

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

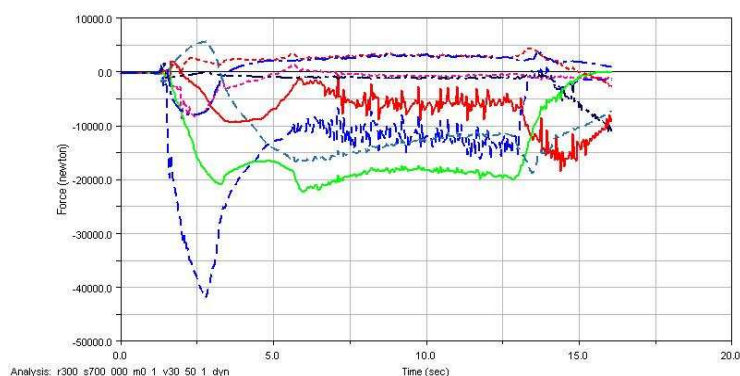


Figura 4.34: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

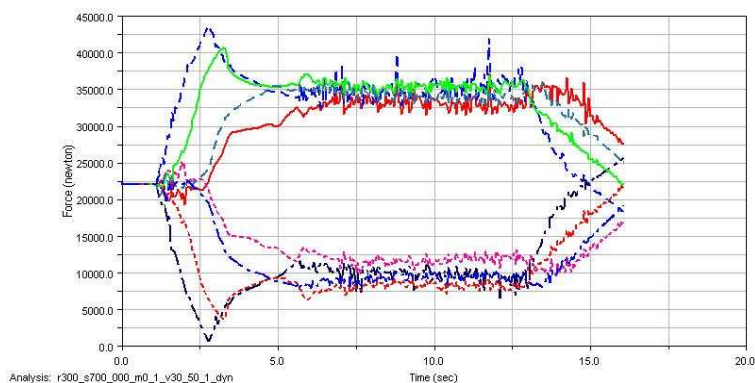


Figura 4.35: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

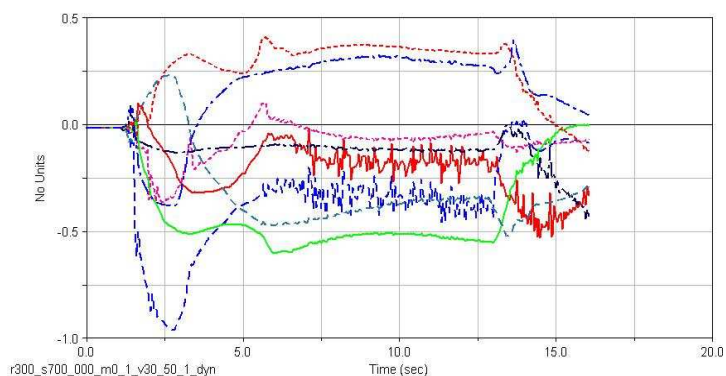


Figura 4.36: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

En el análisis 8, se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.95 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.6 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

### Análisis 9

En la tabla 4.9 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 9 y en las figuras 4.37, 4.38 y 4.39 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.9: Características del análisis 9

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

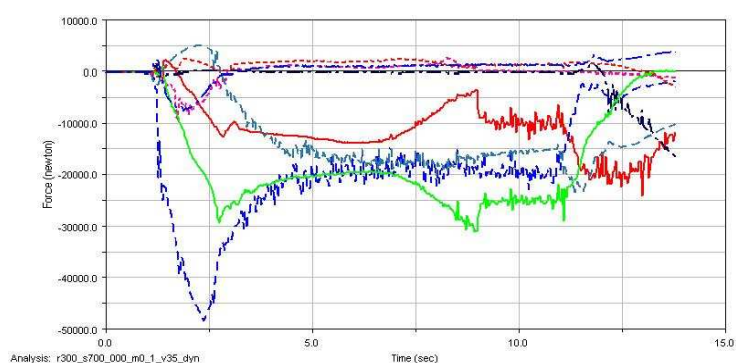


Figura 4.37: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

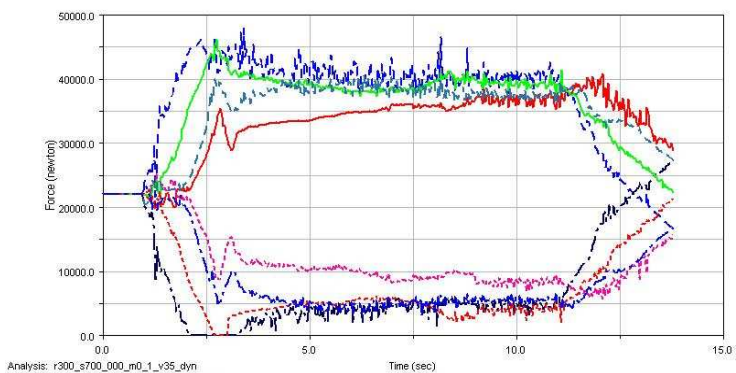


Figura 4.38: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

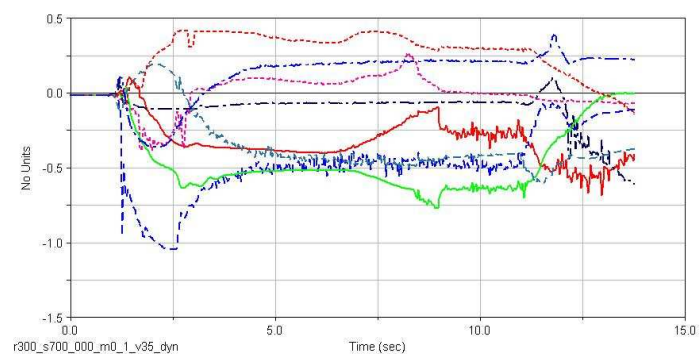


Figura 4.39: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 9 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 1.04 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.77 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. Hay que destacar, que el inicio de la curva es un momento crítico porque la rueda externa delantera del primer bogie (2) obtiene un valor de coeficiente de descarrilamiento superior a 1 y la rueda interna delantera del primer bogie (4) pierde el contacto con el carril desde el segundo 2.1 hasta el segundo 3.6 como se puede ver en la figura 4.38 pero el bogie no descarrila porque el par de ruedas trasero no sufre descarrilamiento. Después del segundo 3.6 el par de ruedas delantero del primer bogie toma contacto total de nuevo con el carril.

#### Análisis 10

En la tabla 4.10 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 10 y en las figuras 4.40, 4.41 y 4.42 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.10: Características del análisis 10

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

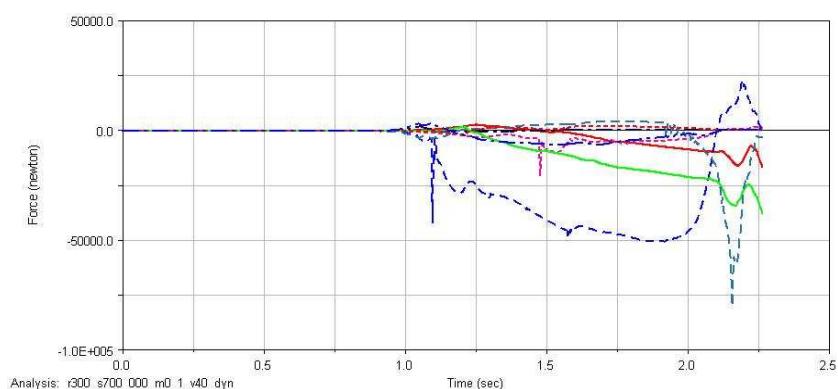


Figura 4.40: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

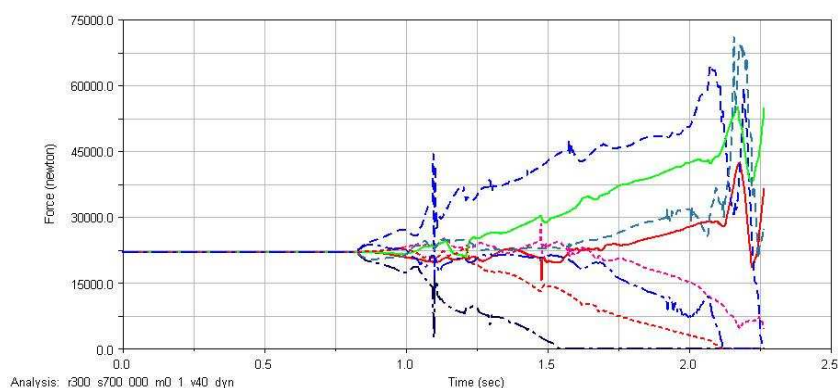
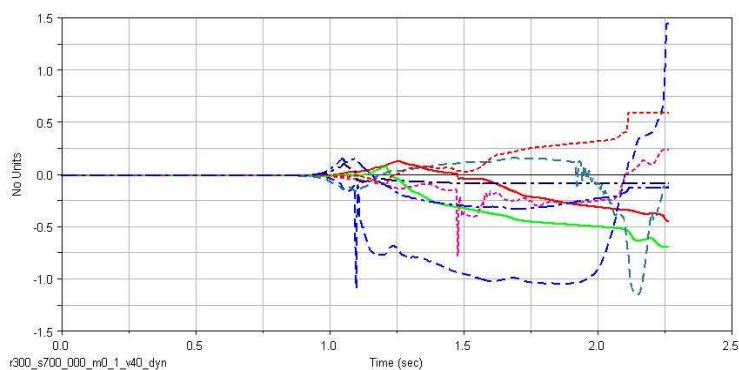


Figura 4.41: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

Figura 4.42: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$ 

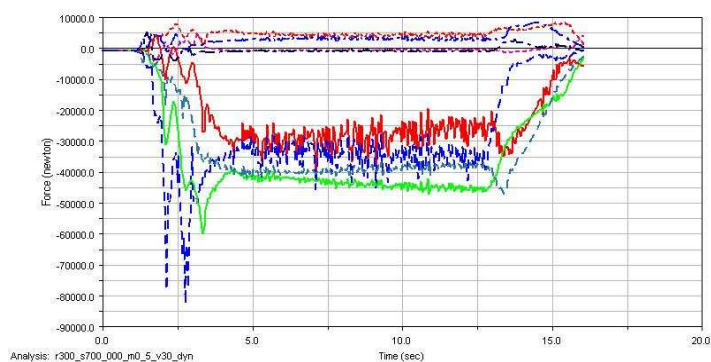
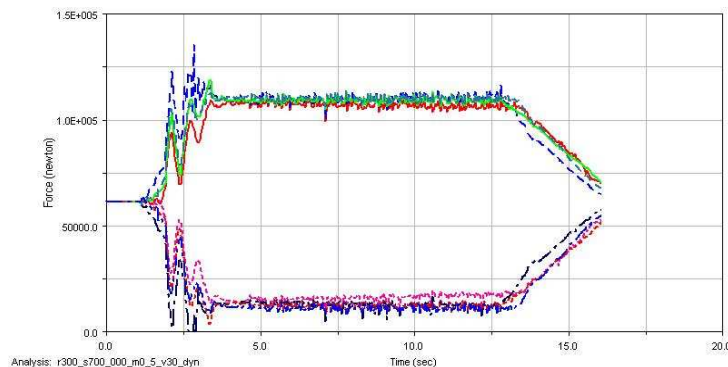
En el análisis 10, el vagón descarrila de la misma forma que en el análisis 2 obteniendo la rueda externa delantera del primer bogie (2) un coeficiente de descarrilamiento de 1.1 y la rueda externa trasera del primer bogie (6) un valor de coeficiente de descarrilamiento de 1.15.

### Análisis 11

En la tabla 4.11 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 11 y en las figuras 4.43, 4.44 y 4.45 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.11: Características del análisis 11

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

Figura 4.43: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.44: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$



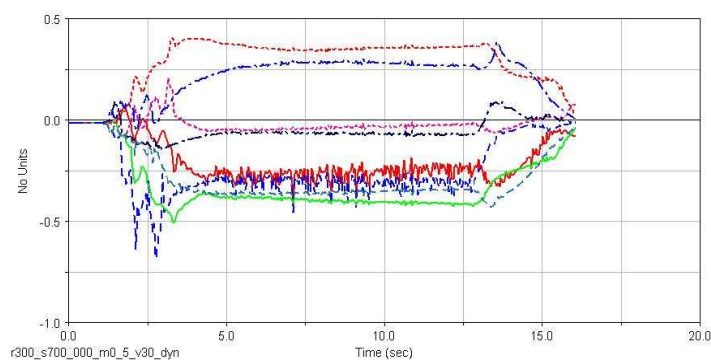


Figura 4.45: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

En el análisis 11, se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.68 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.42 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

### Análisis 12

En la tabla 4.12 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 12 y en las figuras 4.46, 4.47 y 4.48 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.12: Características del análisis 12

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

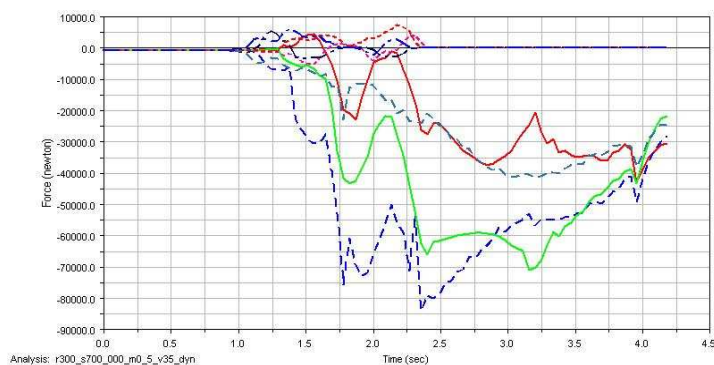


Figura 4.46: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

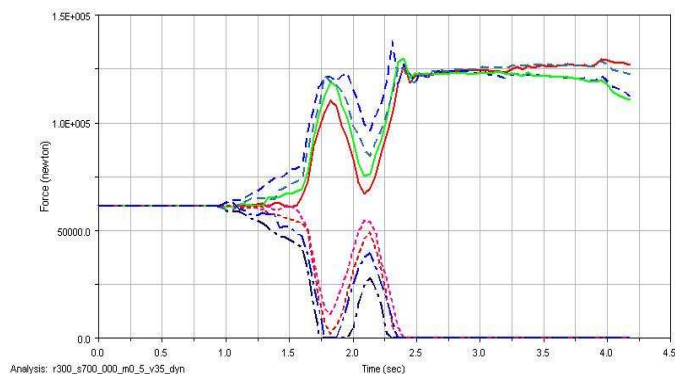


Figura 4.47: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

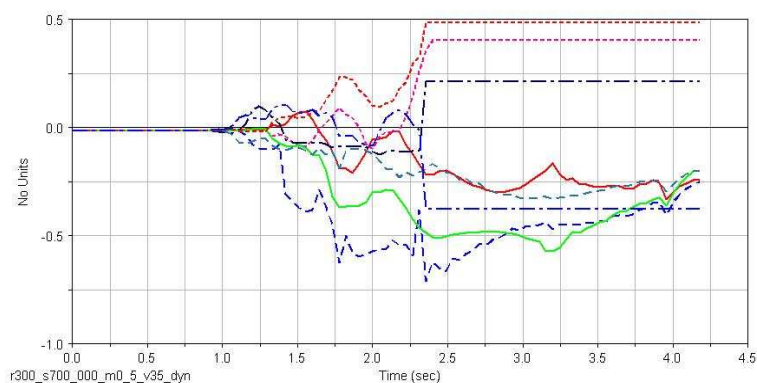


Figura 4.48: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 12, la rueda interna delantera del primer bogie (4) y la rueda interna trasera del primer bogie (8) pierden el contacto con el carril, vuelven a recuperarlo, y finalmente todas las ruedas internas dejan de tener contacto con el carril permanentemente en el mismo orden que en el análisis 7 provocando el vuelco del vagón.

### Análisis 13

En la tabla 4.13 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 13 y en las figuras 4.49, 4.50 y 4.51 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.13: Características del análisis 13

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

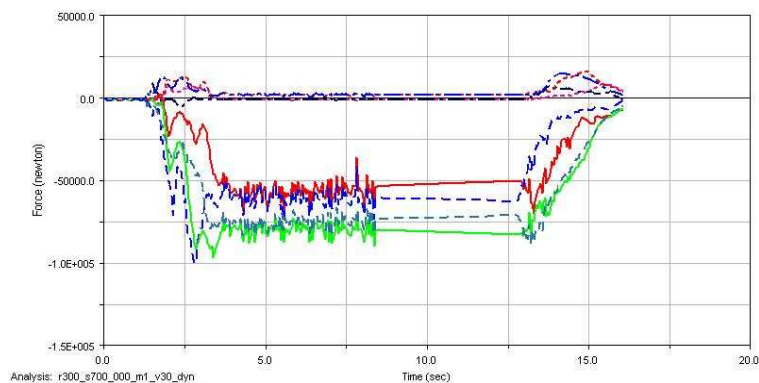
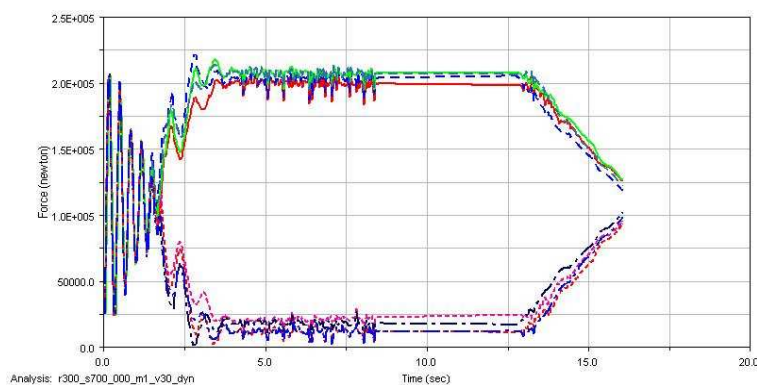
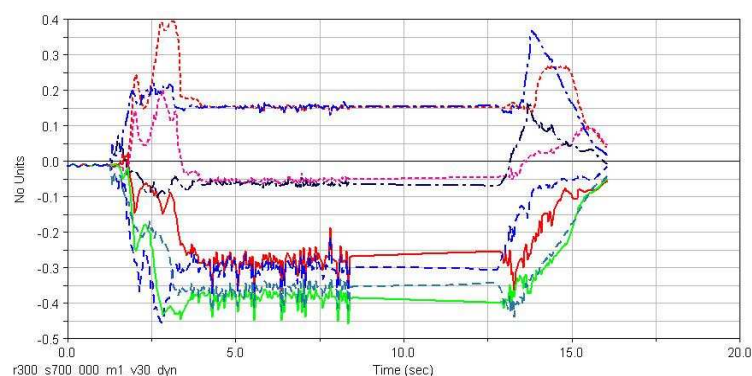


Figura 4.49: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$



Figura 4.50: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.51: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ 

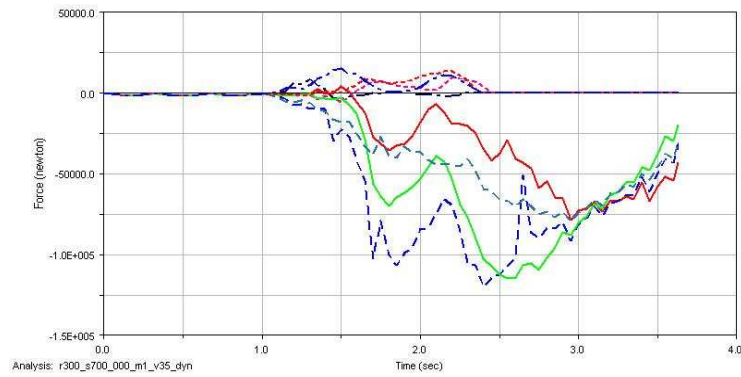
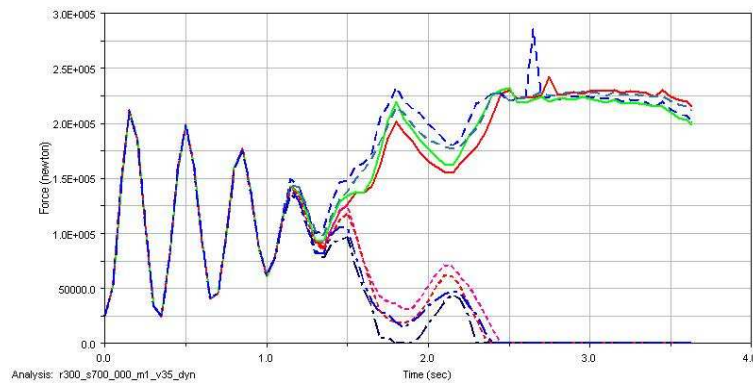
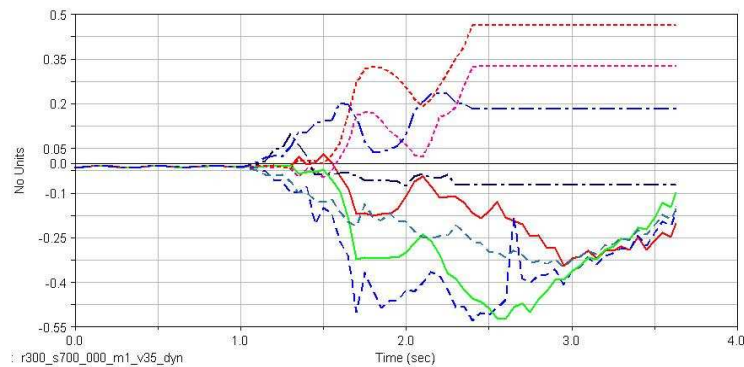
En el análisis 11, se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.45 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.45 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.49 se aprecia como estas dos ruedas sufren similar empuje lateral tanto en el inicio de la curva como en el transcurso de ésta.

#### Análisis 14

En la tabla 4.14 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 14 y en las figuras 4.52, 4.53 y 4.54 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.14: Características del análisis 14

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

Figura 4.52: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ Figura 4.53: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ Figura 4.54: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ 

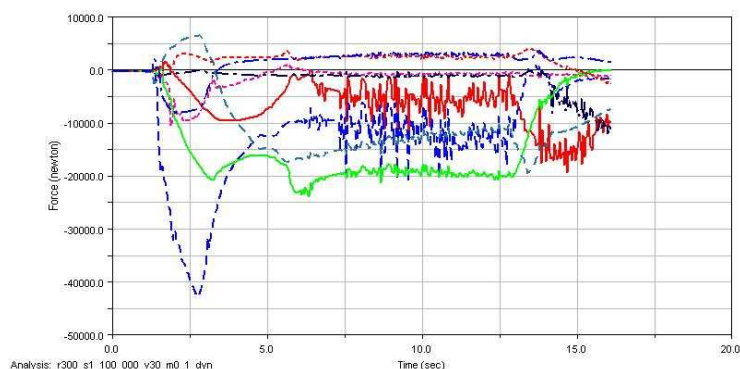
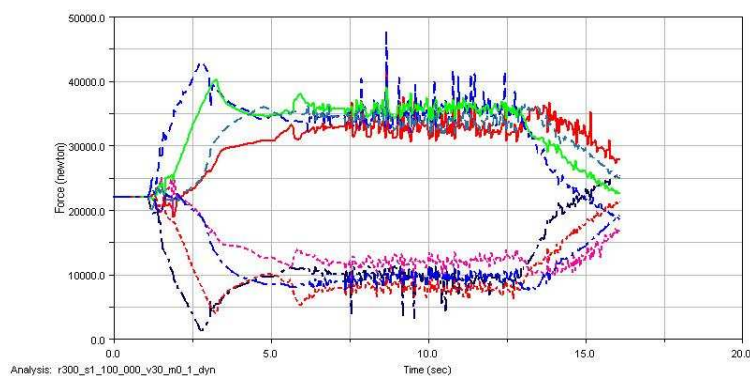
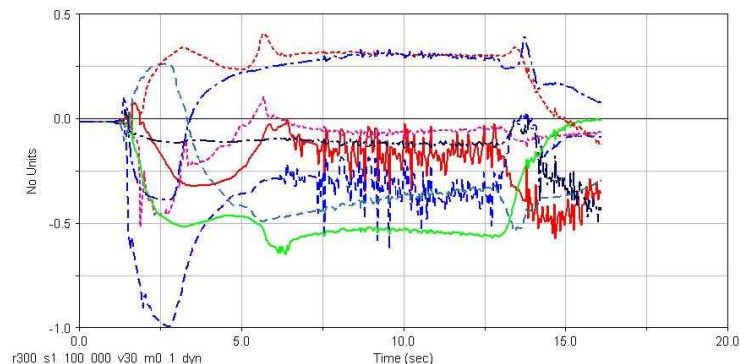
En el análisis 14, la rueda interna delantera del primer bogie (4) pierde el contacto con el carril y, tras recuperarlo, vuelve a perderlo junto a las demás ruedas internas en el mismo orden que en el análisis 12.

#### Análisis 15

En la tabla 4.15 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 15 y en las figuras 4.55, 4.56 y 4.57 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.15: Características del análisis 15

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

Figura 4.55: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.56: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.57: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ 

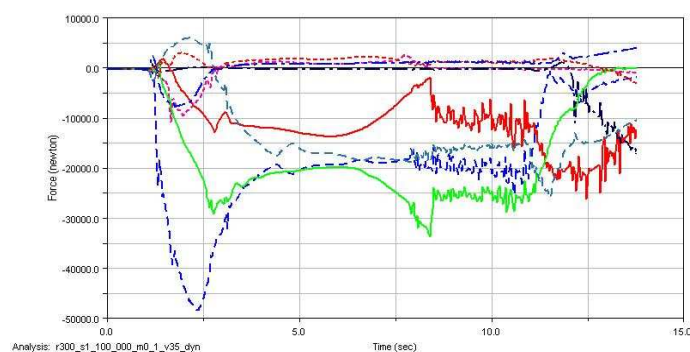
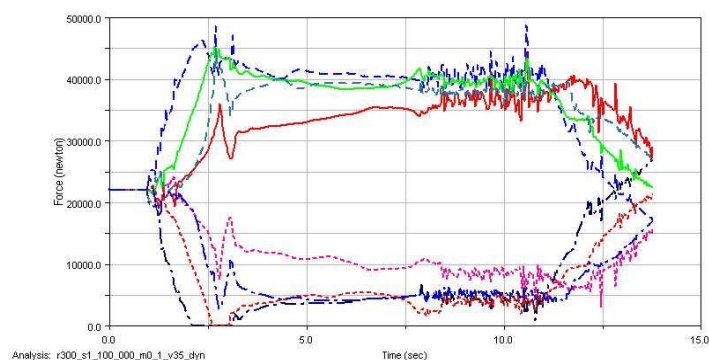
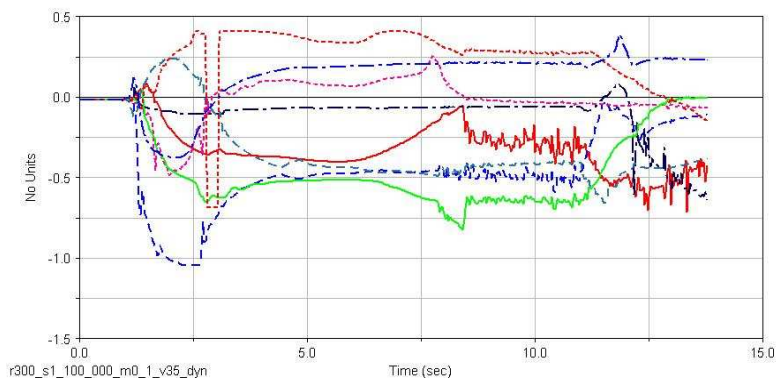
En el análisis 15, se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.99 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.65 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 16

En la tabla 4.16 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 16 y en las figuras 4.58, 4.59 y 4.60 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.16: Características del análisis 16

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

Figura 4.58: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ Figura 4.59: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ Figura 4.60: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ 

En el análisis 16, se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 1.05 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.82 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. Hay que destacar, que el inicio de la curva es un momento crítico porque la rueda externa delantera del primer bogie (2) obtiene un coeficiente de descarrilamiento superior a 1 y la rueda interna delantera del primer bogie (4) deja de perder el contacto con el carril desde el segundo 2.1 hasta el 3.13 como se puede ver en la figura 4.59 pero el bogie no descarrila porque el par de ruedas trasero no sufre descarrilamiento. Después del segundo 3.6 el par de

ruedas delantero del primer bogie toma contacto total de nuevo con el carril. La rueda interna trasera del segundo bogie (7) también deja de tener contacto con el carril del segundo 2.6 al 3.03.

### Análisis 17

En la tabla 4.17 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 17 y en las figuras 4.61, 4.62 y 4.63 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.17: Características del análisis 17

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

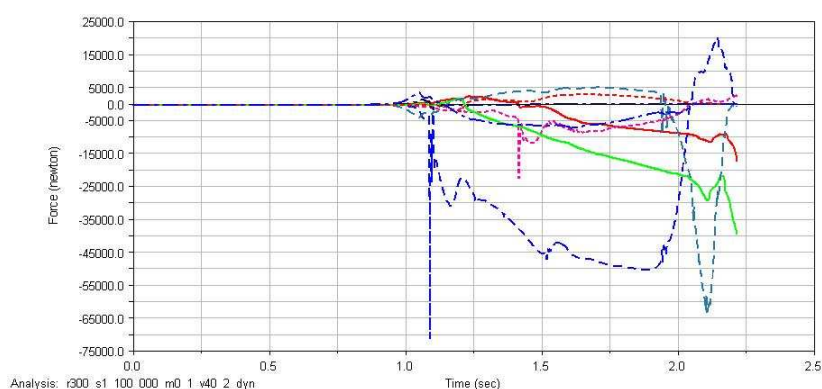


Figura 4.61: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

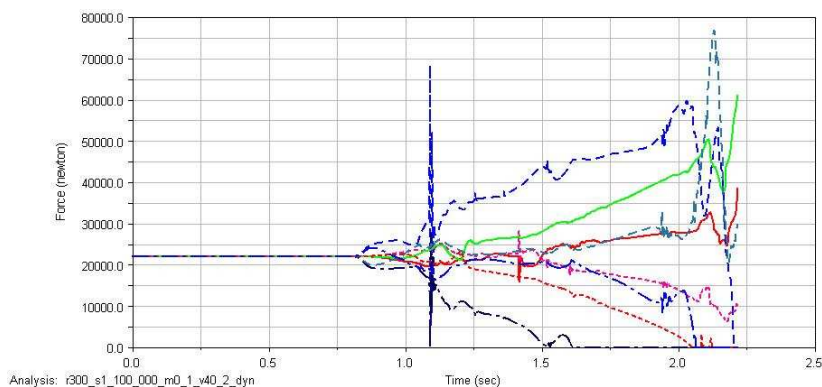


Figura 4.62: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

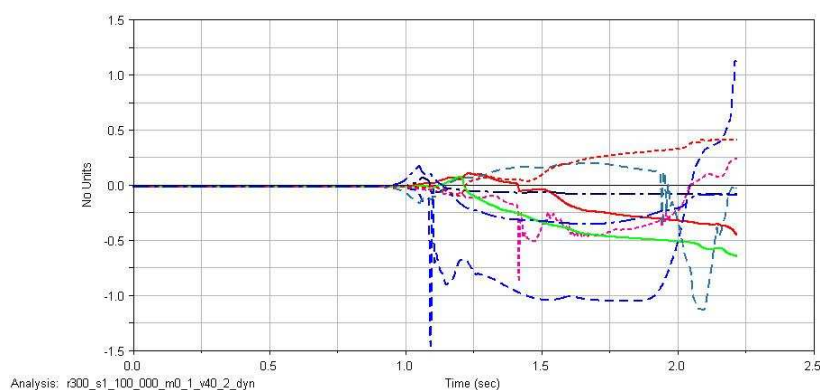


Figura 4.63: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 17 el vagón descarrila de la misma forma que en el análisis 2 obteniendo la rueda externa delantera del primer bogie (2) un coeficiente de descarrilamiento máximo de 1.46 y de 1.04 en el momento del descarrile y la rueda externa trasera del primer bogie (6) un valor de coeficiente de descarrilamiento de 1.13.

#### Análisis 18

En la tabla 4.18 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 18 y en las figuras 4.64, 4.65 y 4.66 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.18: Características del análisis 18

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

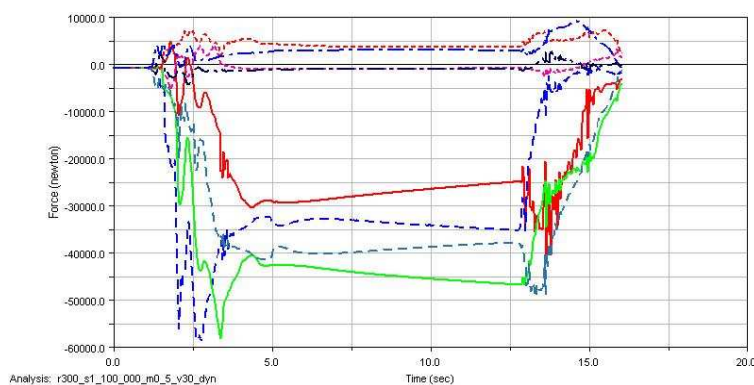


Figura 4. 64: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$



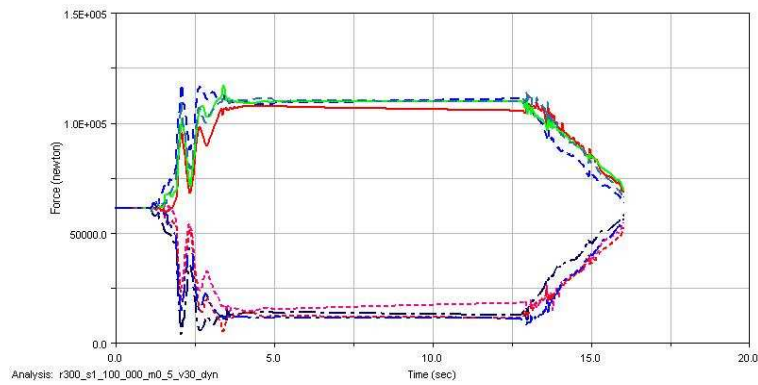


Figura 4.65: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

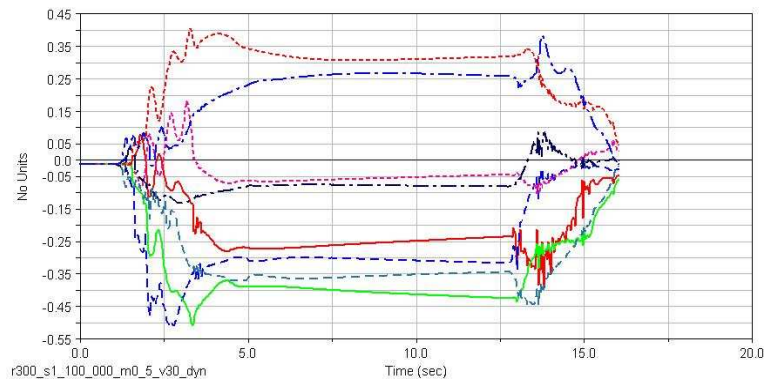


Figura 4.66: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

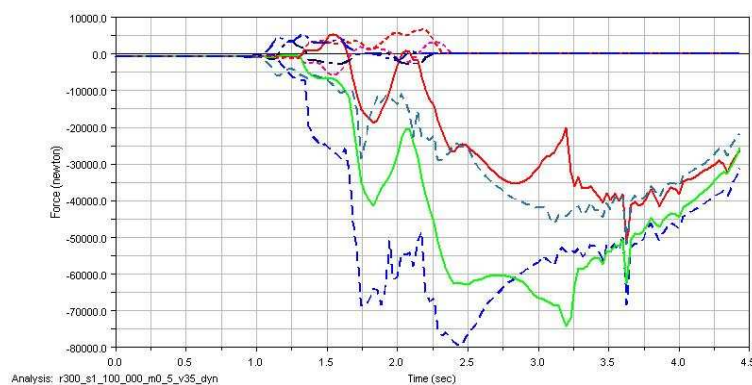
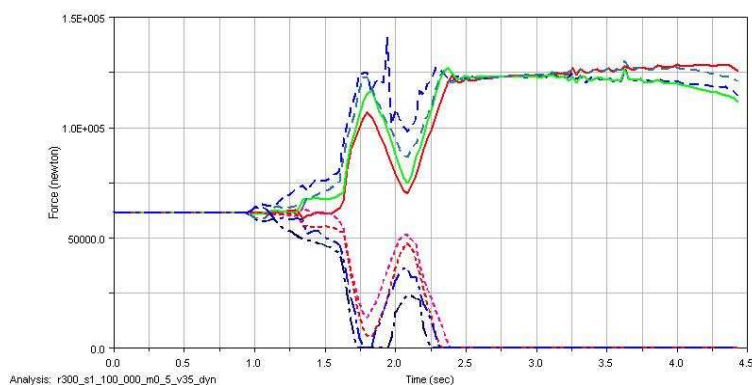
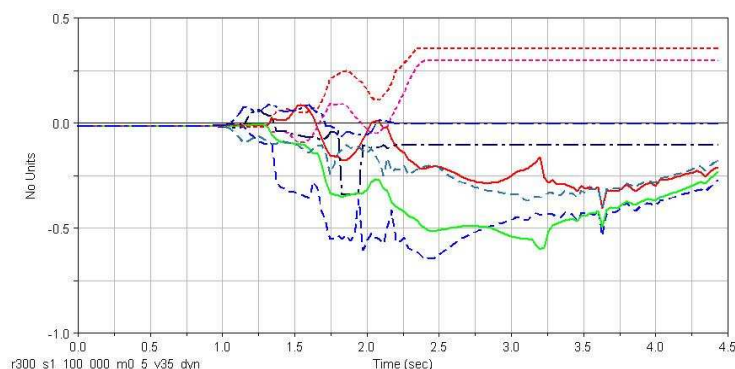
En el análisis 18 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.5 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) y para la rueda externa trasera del segundo bogie (5) entrando en la curva y un valor máximo de 0.43 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.64 se aprecia como estas dos ruedas sufren una similar concentración de empuje lateral en el inicio de la curva.

#### Análisis 19

En la tabla 4.19 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 19 y en las figuras 4.67, 4.68 y 4.69 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.19: Características del análisis 19

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

Figura 4.67: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ Figura 4.68: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ Figura 4.69: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ 

En el análisis 19 se produce un vuelco del vagón en el mismo orden que en el análisis 12.

#### Análisis 20

En la tabla 4.20 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 20 y en las figuras 4.70, 4.71 y 4.72 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.20: Características del análisis 20

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30



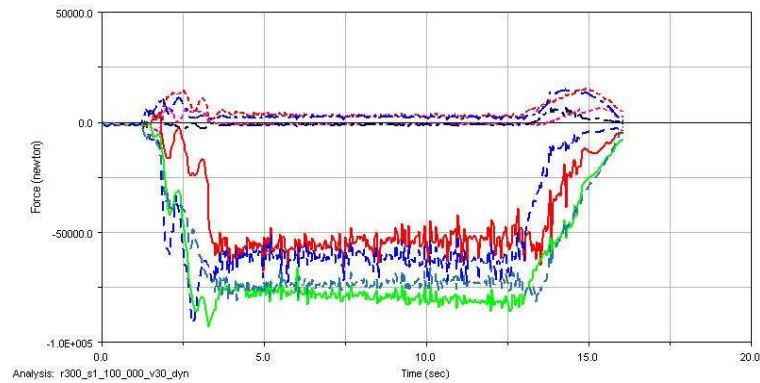


Figura 4.70: Fuerza lateral  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

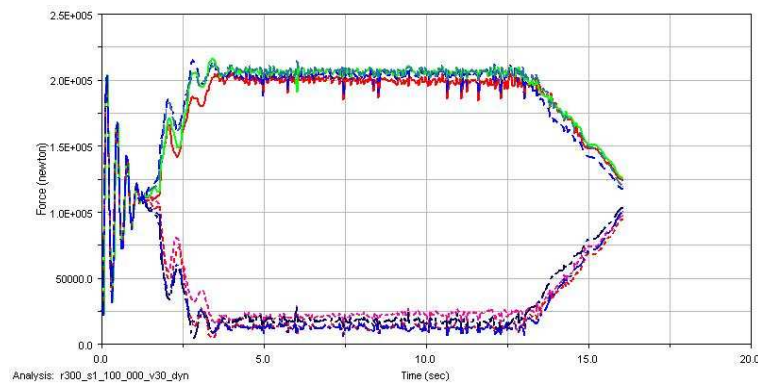


Figura 4.71: Fuerza vertical  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

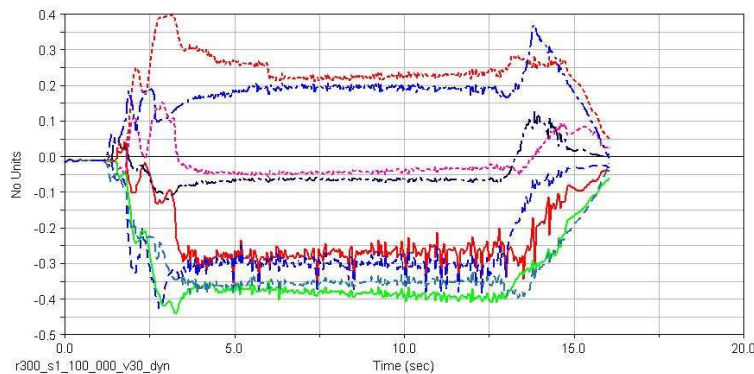


Figura 4.72: Coef. Desc  $r=300\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

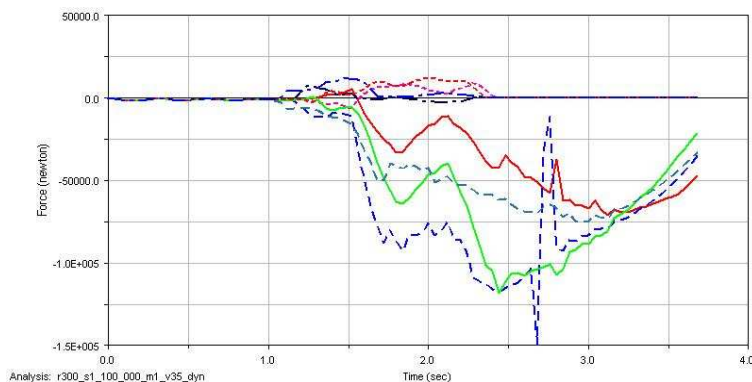
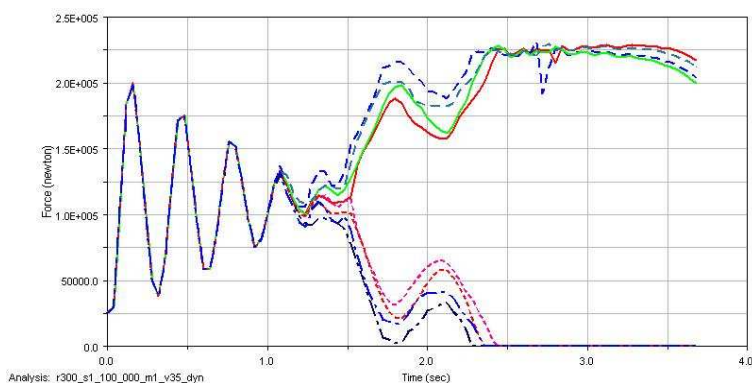
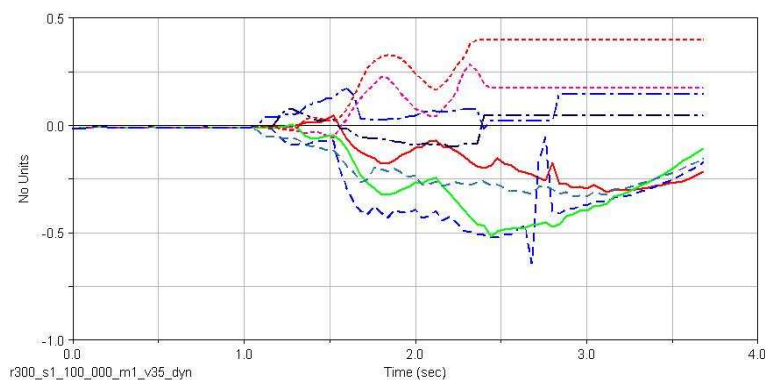
En el análisis 20 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.44 para la rueda externa trasera del segundo bogie (5) entrando en la curva y un valor máximo de 0.41 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.70 se aprecia como la rueda externa trasera del segundo bogie (5) y la rueda externa delantera del primer bogie (2) sufren una similar concentración de empuje lateral en el inicio de la curva.

#### Análisis 21

En la tabla 4.21 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 20 y en las figuras 4.73, 4.74 y 4.75 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.21: Características del análisis 21

<b>Radio de la curva (m)</b>	300	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

Figura 4.73: Fuerza lateral  $r=300m$ ;  $k=900000N/m$ ;  $m=40000kg$ ;  $v=35m/s$ Figura 4.74: Fuerza vertical  $r=300m$ ;  $k=900000N/m$ ;  $m=40000kg$ ;  $v=35m/s$ Figura 4.75: Coef. Desc  $r=300m$ ;  $k=900000N/m$ ;  $m=40000kg$ ;  $v=35m/s$ 

Las ruedas internas pierden el contacto con el carril en el siguiente orden: la rueda interna delantera del primer bogie (4) la rueda interna trasera del segundo bogie (7), la rueda interna trasera del primer bogie (8) y la rueda interna delantera del segundo bogie (3) produciéndose el vuelco del vagón.

### Análisis 22

En la tabla 4.22 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 22 y en las figuras 4.76, 4.77 y 4.78 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.22: Características del análisis 22

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

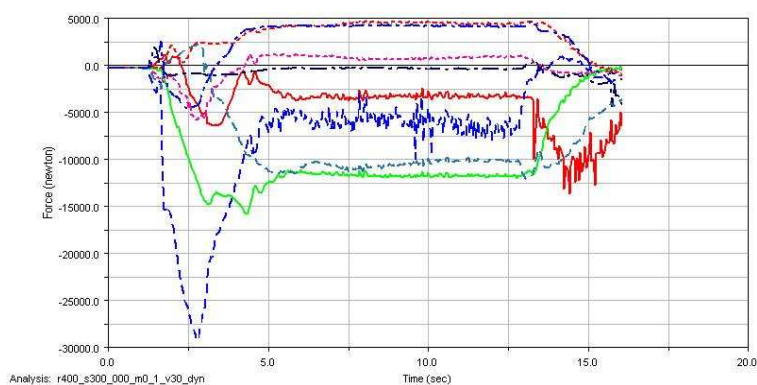


Figura 4.76: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

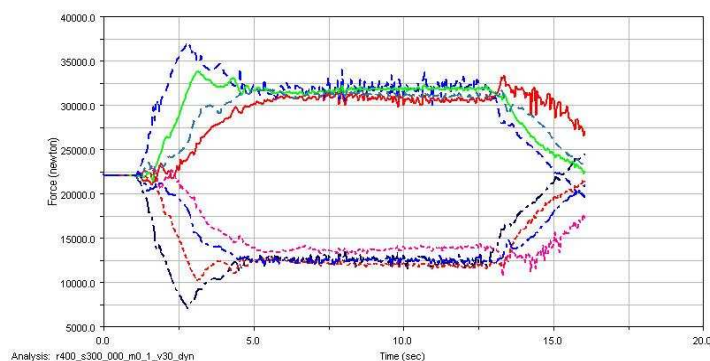


Figura 4.77: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

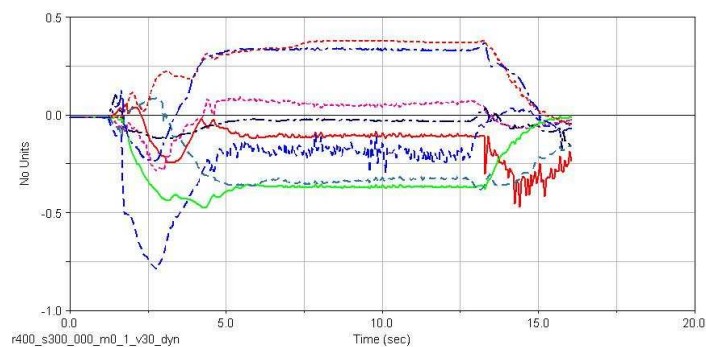


Figura 4.78: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

En el análisis 22 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.79 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor

máximo de 0.37 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la recta final la rueda alcanza un coeficiente de descarrilamiento de 0.47 antes de estabilizarse.

Análisis 23

En la tabla 4.23 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 23 y en las figuras 4.79, 4.80 y 4.81 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.23: Características del análisis 23

Radio de la curva (m)	400	K (N/m)	100.000
Masa (kg)	4000	Velocidad (m/s)	35

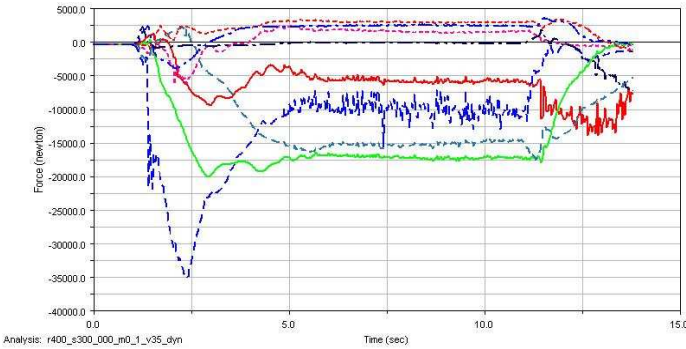


Figura 4.79: Fuerza lateral r=400m; k=100000N/m; m=4000kg; v=35m/s

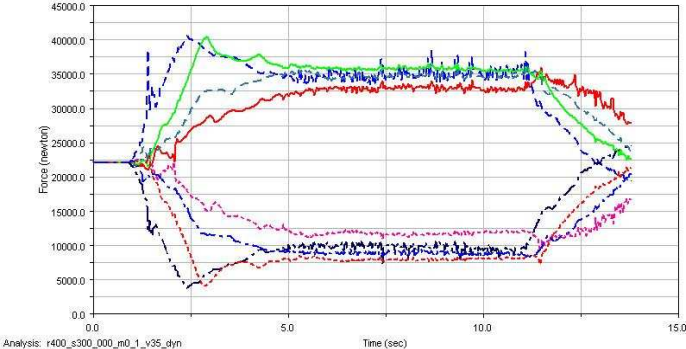


Figura 4.80: Fuerza vertical r=400m; k=100000N/m; m=4000kg; v=35m/s

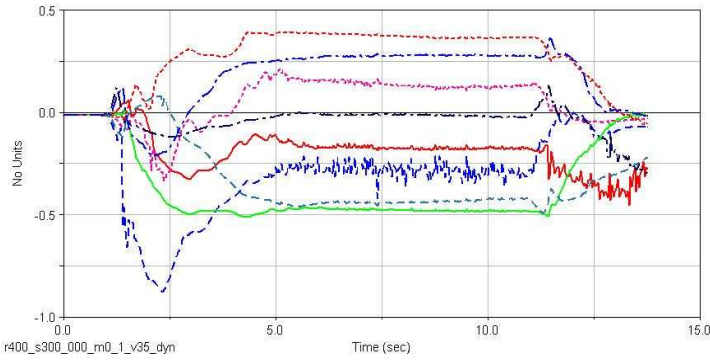


Figura 4.81: Coef. Desc r=400m; k=100000N/m; m=4000kg; v=35m/s

En el análisis 23 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.87 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.48 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 24

En la tabla 4.24 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 24 y en las figuras 4.82, 4.83 y 4.84 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.24: Características del análisis 24

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

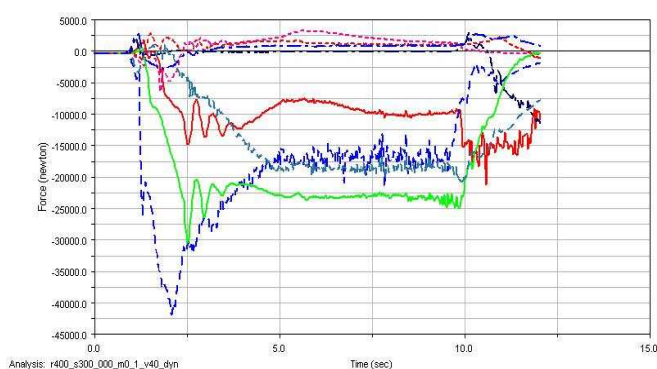


Figura 4.82: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

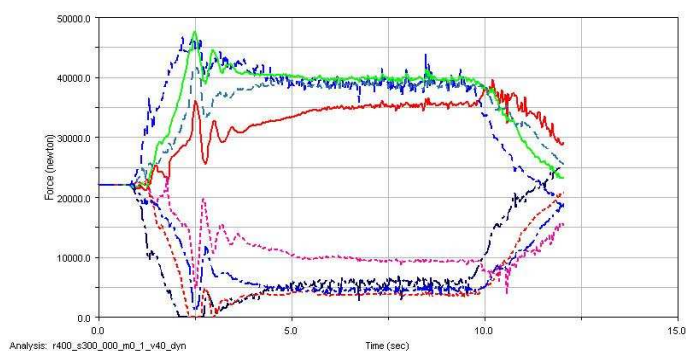


Figura 4.83: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

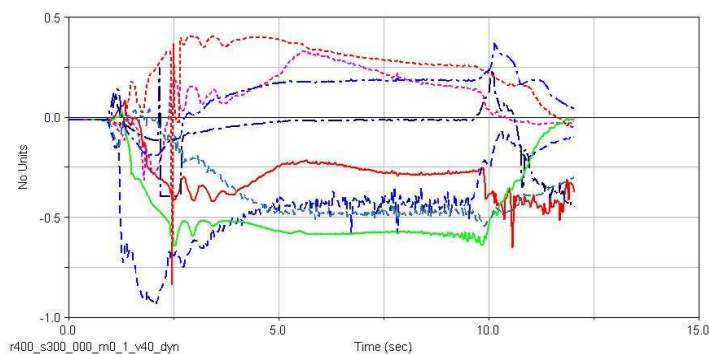


Figura 4.84: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 24 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.93 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.6 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. Se ha de destacar que la rueda interna delantera del primer bogie (4) y la rueda interna trasera del segundo bogie (7) dejan de tener contacto con el carril durante 0.7 s y 0.26 s respectivamente al entrar en la curva como se puede apreciar en la figura 4.83.

#### Análisis 25

En la tabla 4.25 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 25 y en las figuras 4.85, 4.86 y 4.87 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.25: Características del análisis 25

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45

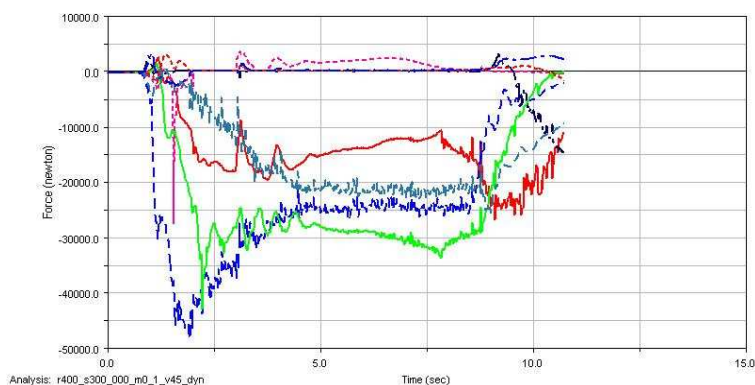


Figura 4.85: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

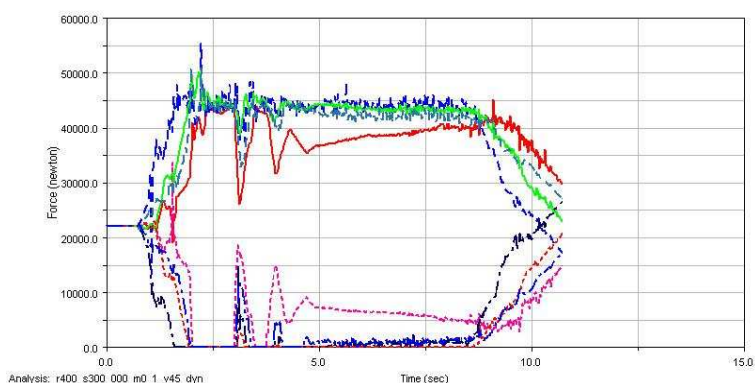


Figura 4.86: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$



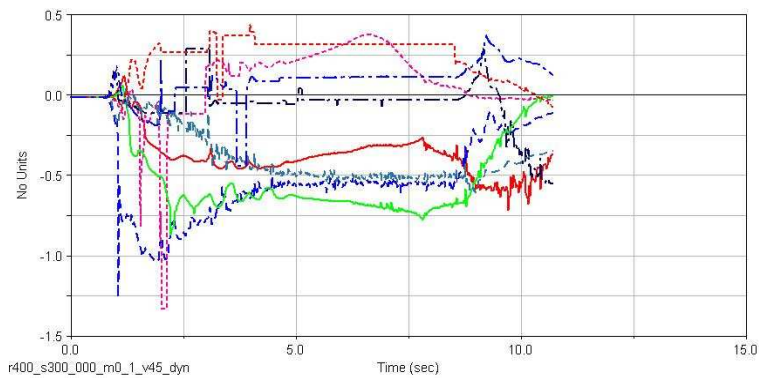


Figura 4.87: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

En el análisis 25 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 1.26 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.78 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. Se puede apreciar en la figura 4.86 que el vagón realiza la trayectoria pero de forma muy inestable, al entrar en la curva las cuatro ruedas internas pierden el contacto con el carril, y durante el transcurso de la curva la rueda interna trasera del segundo bogie (7), en gran parte del recorrido no tiene contacto con el carril. El momento más crítico se produce cuando la rueda externa delantera del primer bogie (2) obtiene un coeficiente de descarrilamiento de 1.03 durante 0.1 s y las ruedas interna trasera del primer bogie (8) y interna delantera del primer bogie (4) pierden el contacto con el carril, pese a ello, el bogie no descarrila porque la rueda externa trasera del primer bogie (6) se sigue manteniendo en su sitio.

Análisis 26

En la tabla 4.26 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 26 y en las figuras 4.88, 4.89 y 4.90 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.26: Características del análisis 26

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	50

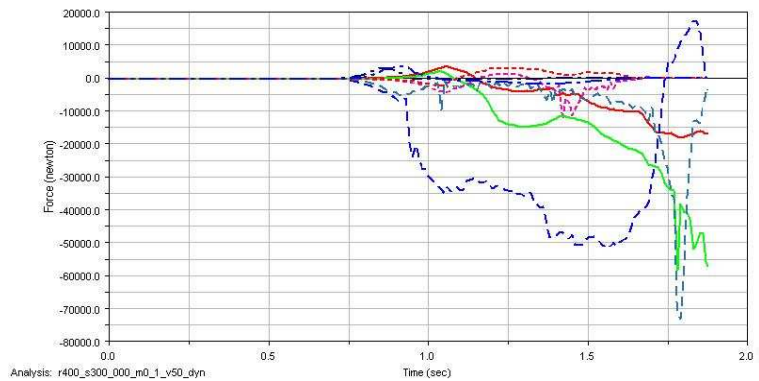


Figura 4.88: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

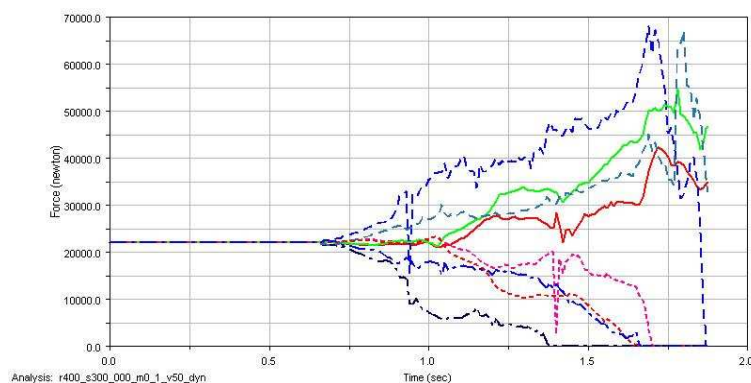


Figura 4.89: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

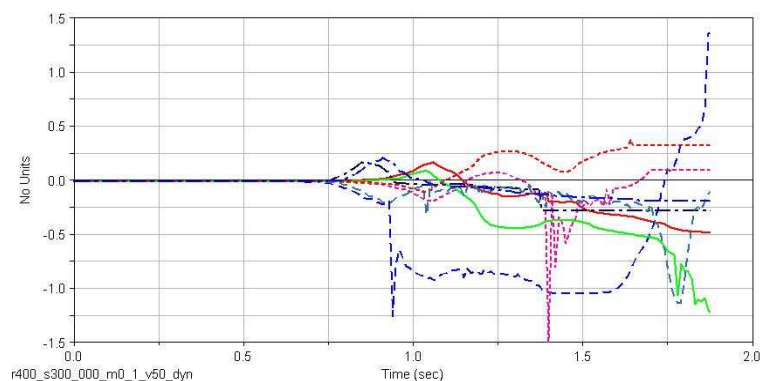


Figura 4.90: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

En el análisis 26 el vagón descarrila de la misma forma que en el análisis 2 obteniendo la rueda externa delantera del primer bogie (2) un coeficiente de descarrilamiento máximo de 1.25 y de 1.05 en el momento del descarrile y la rueda externa trasera del primer bogie (6) un valor de coeficiente de descarrilamiento de 1.14.

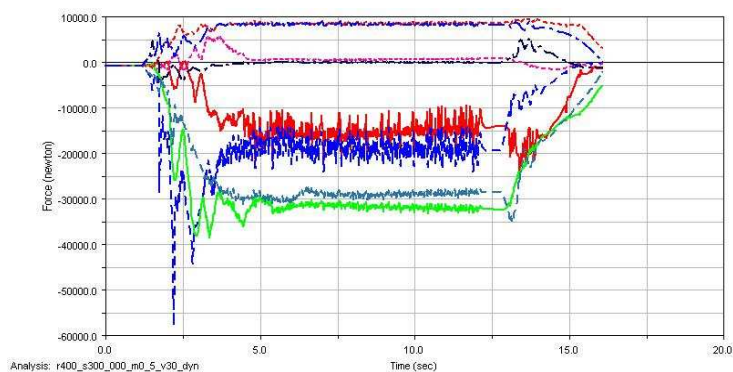
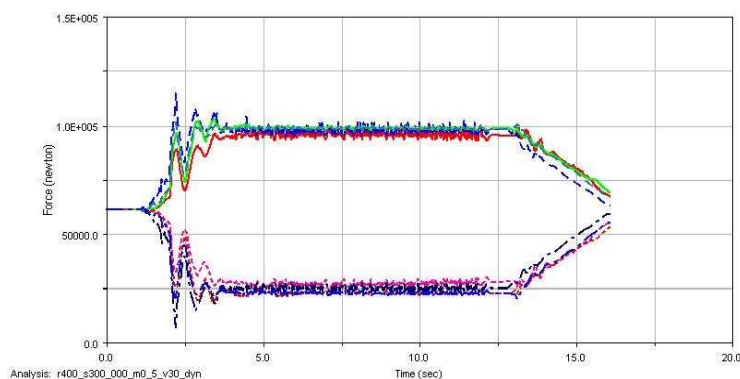
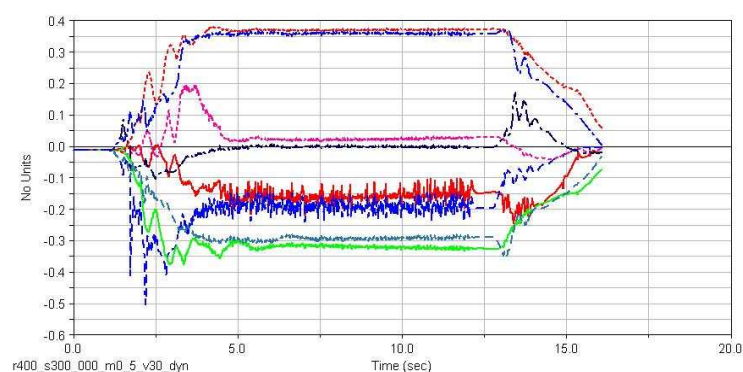
#### Análisis 27

En la tabla 4.27 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 27 y en las figuras 4.91, 4.92 y 4.93 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.27: Características del análisis 27

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30



Figura 4.91: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.92 Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.93: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ 

En el análisis 27 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.5 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.33 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 28

En la tabla 4.28 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 28 y en las figuras 4.94, 4.95 y 4.96 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.28: Características del análisis 28

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

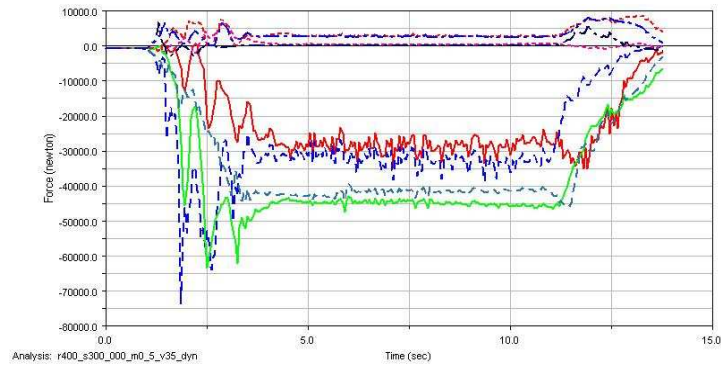


Figura 4.94: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

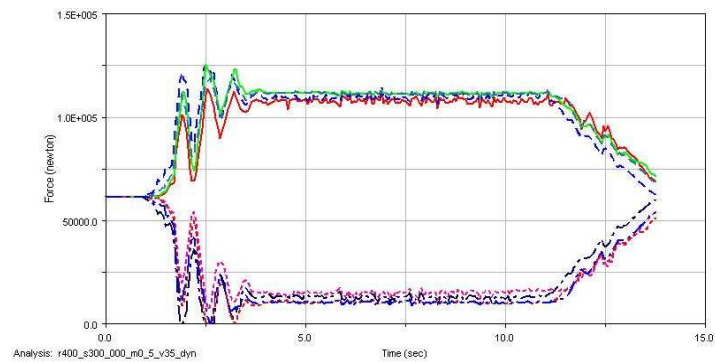


Figura 4.95: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

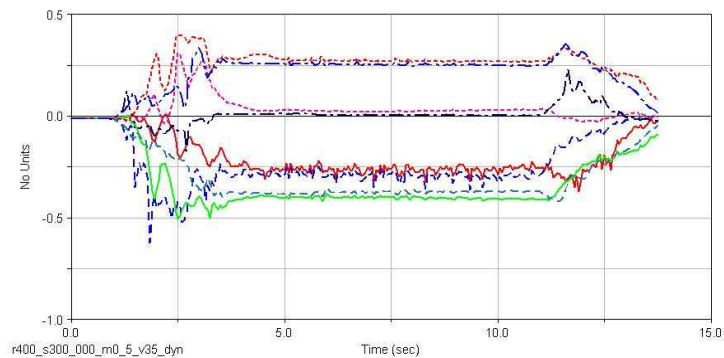


Figura 4.96: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 28 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.62 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.41 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.95 se observa como las ruedas interna delantera del primer bogie (4) e interna trasera del segundo bogie (7) pierden el contacto con el carril durante dos periodos de tiempo al principio de la curva.

#### Análisis 29

En la tabla 4.29 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 29 y en las figuras 4.97, 4.98 y 4.99 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.29: Características del análisis 29

Radio de la curva (m)	400	K (N/m)	100.000
Masa (kg)	20000	Velocidad (m/s)	40

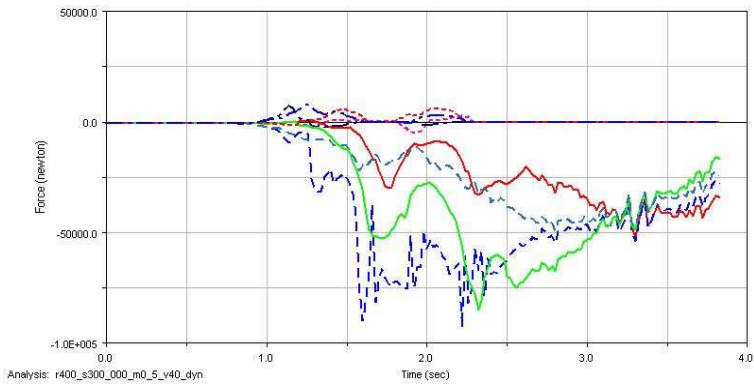


Figura 4.97: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

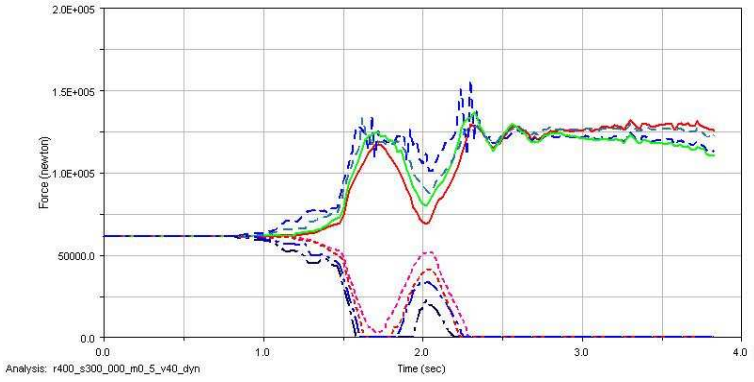


Figura 4.98: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

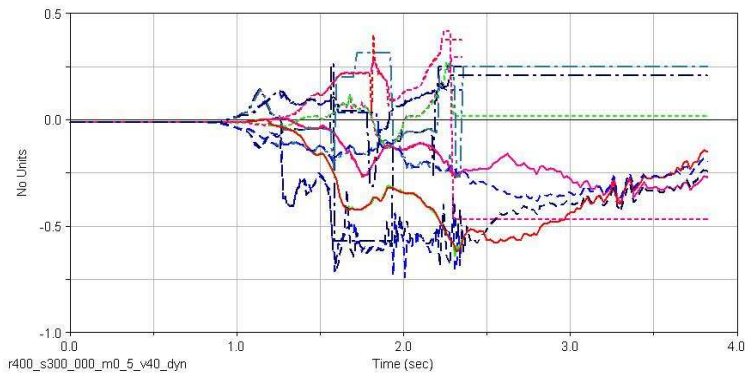


Figura 4.99: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

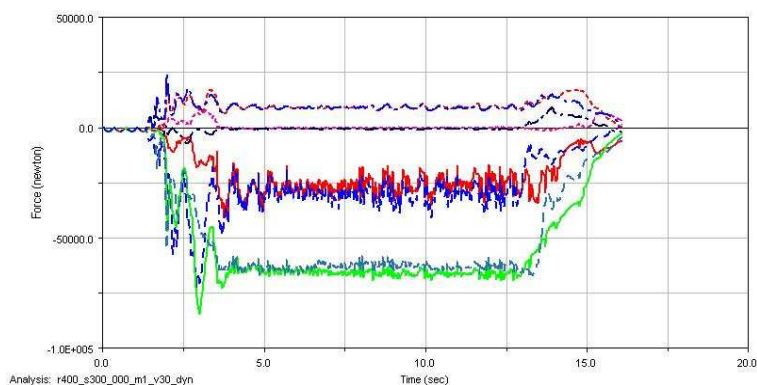
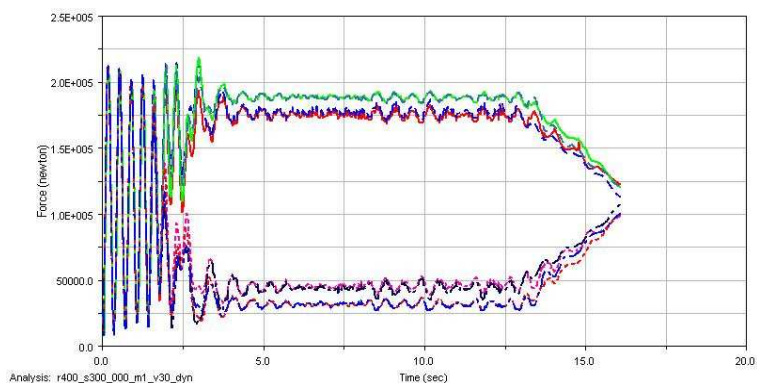
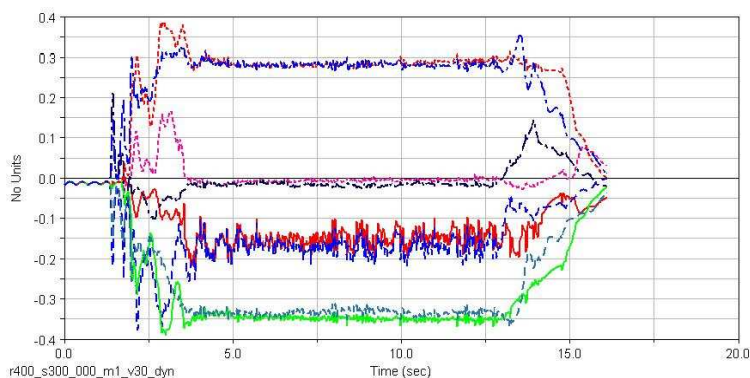
En el análisis 29 se produce un vuelco en el mismo orden que en el análisis 5.

Análisis 30

En la tabla 4.30 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 30 y en las figuras 4.100, 4.101 y 4.102 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.30: Características del análisis 30

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

Figura 4.100: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.101: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.102: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ 

En el análisis 30 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.38 para la rueda externa trasera del segundo bogie (5) entrando en la curva y un valor máximo de 0.37 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.100 se aprecia como la rueda externa trasera del segundo bogie (5) y la rueda externa trasera del primer bogie (6) sufren una similar concentración de empuje lateral en el transcurso de la curva.

### Análisis 31

En la tabla 4.31 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 31 y en las figuras 4.103, 4.104 y 4.105 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.31: Características del análisis 31

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

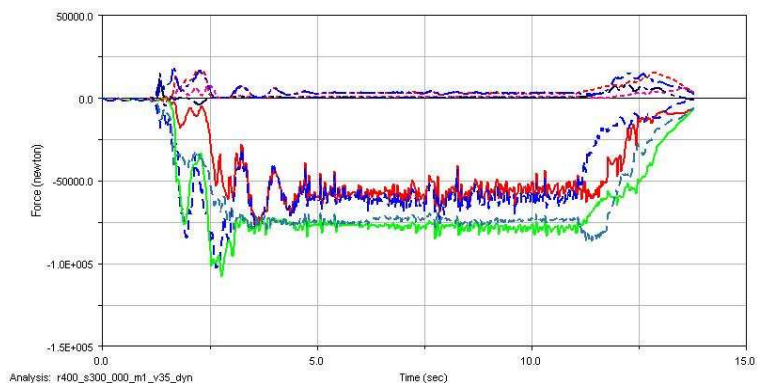


Figura 4.103: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

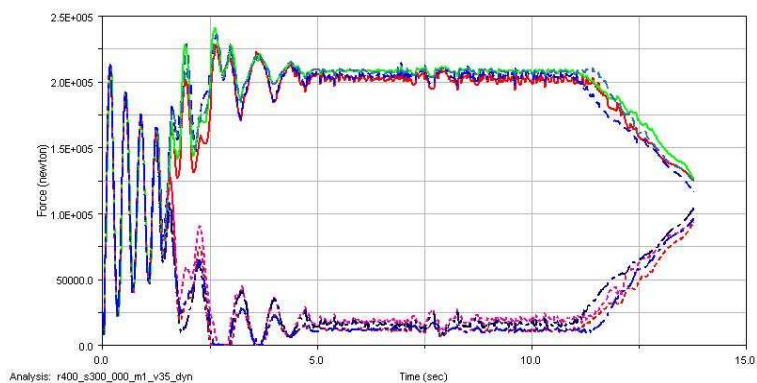


Figura 4.104: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

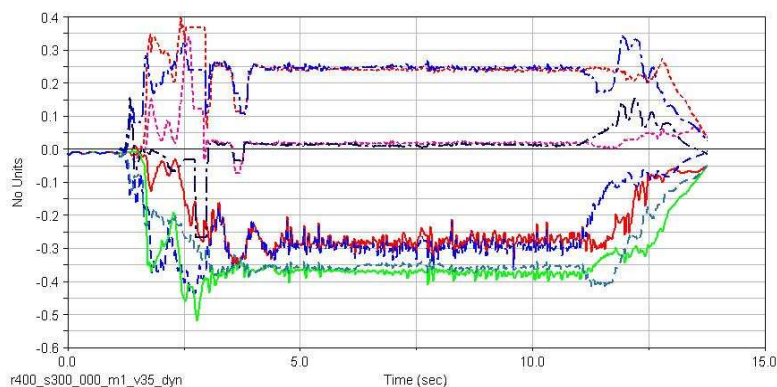


Figura 4.105: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 31 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.52 para la rueda externa trasera del segundo bogie (5) entrando en la curva y un valor

máximo de 0.4 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.104 se observa como la fuerza vertical de las ruedas internas llega a 0 en dos ocasiones en la entrada de la curva.

### Análisis 32

En la tabla 4.32 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 32 y en las figuras 4.106, 4.107 y 4.108 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.32: Características del análisis 32

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

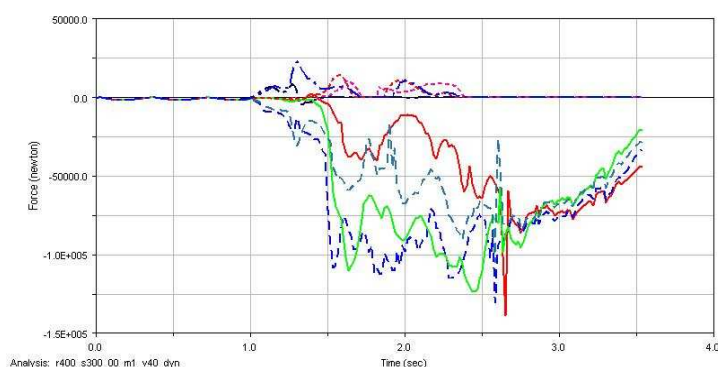


Figura 4.106: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

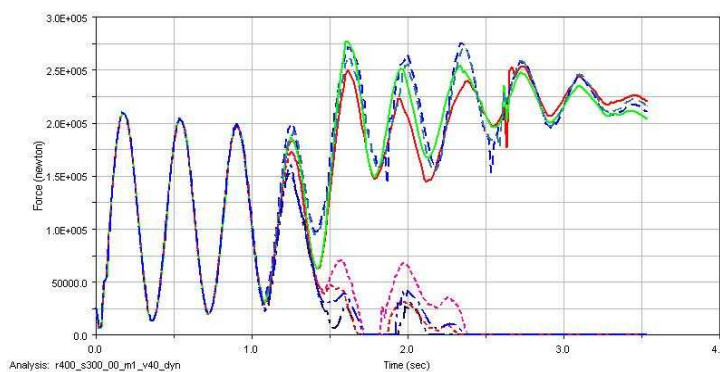


Figura 4.107: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

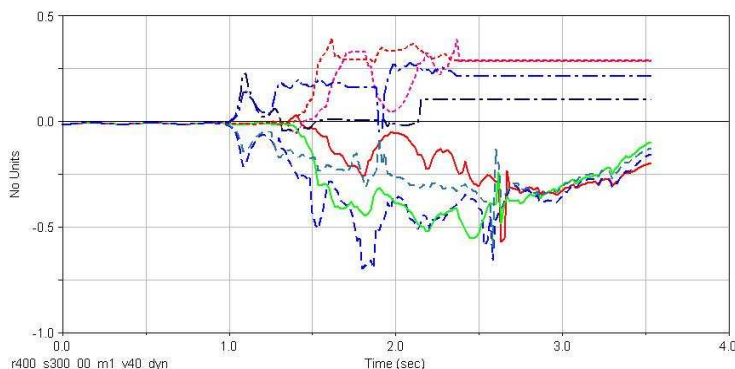


Figura 4.108: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$



Las ruedas internas dejan de tener contacto entrando en la curva, tras recuperarlo, lo vuelven a perder permanentemente en el mismo orden que en el análisis 5 produciéndose el vuelco del vagón.

### Análisis 33

En la tabla 4.33 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 33 y en las figuras 4.109, 4.110 y 4.111 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.33: Características del análisis 33

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

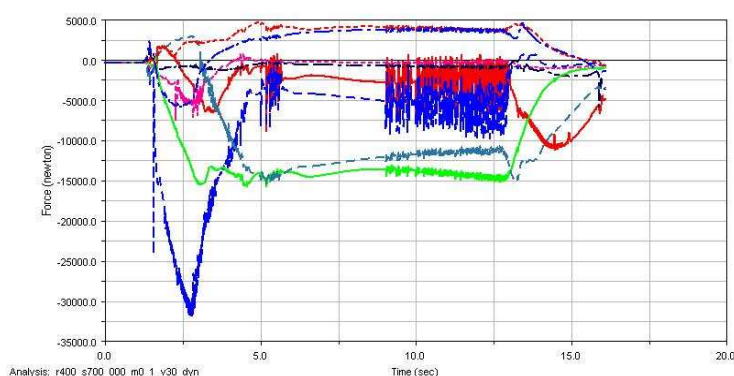


Figura 4.109: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

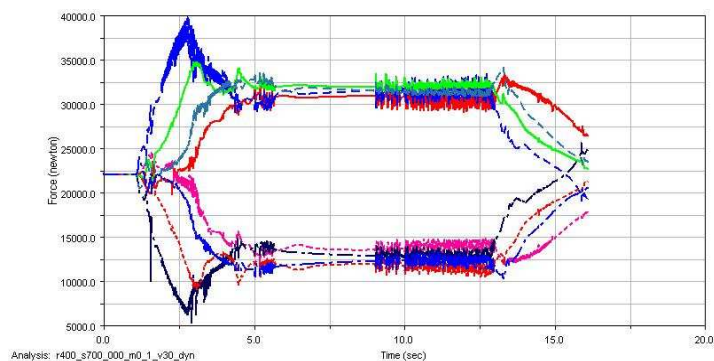


Figura 4.110: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

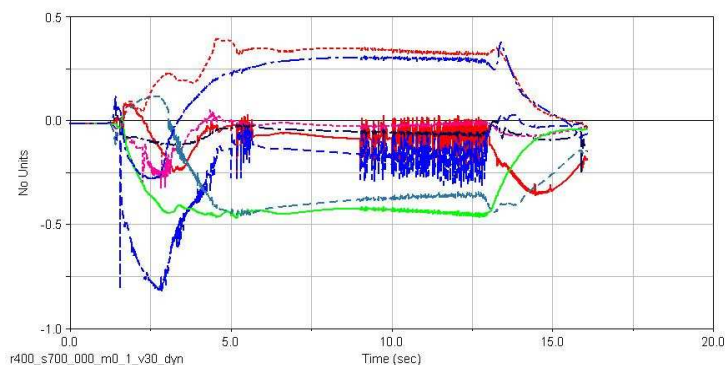


Figura 4.111: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

En el análisis 28 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.83 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.47 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 34

En la tabla 4.34 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 34 y en las figuras 4.112, 4.113 y 4.114 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.34: Características del análisis 34

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

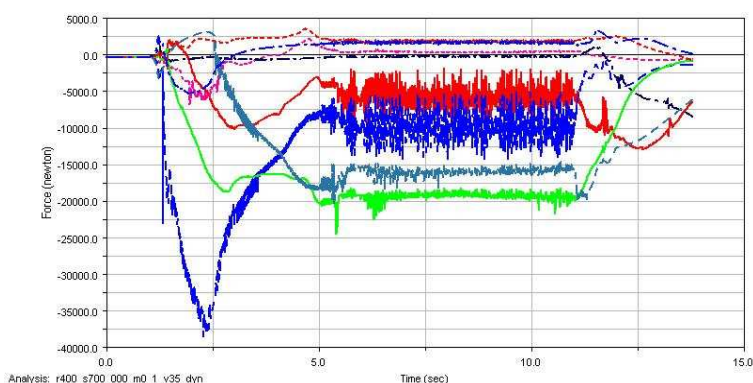


Figura 4.112: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

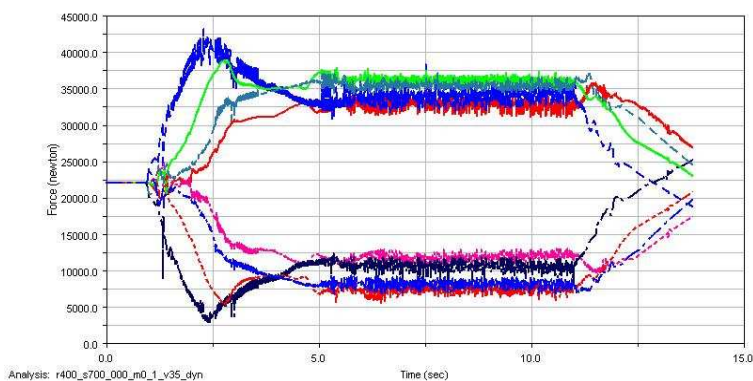


Figura 4.113: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$



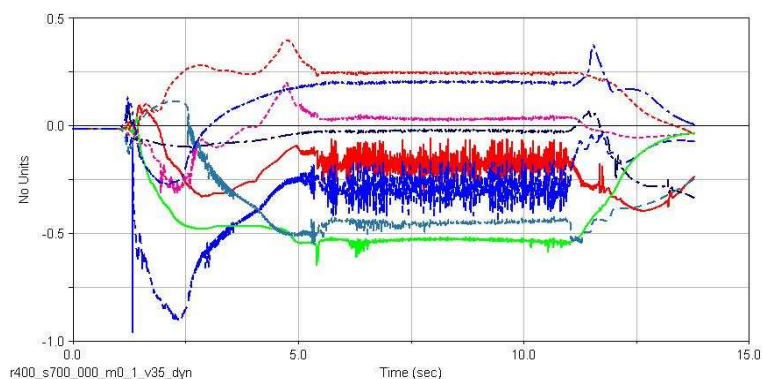


Figura 4.114: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 28 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.96 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.64 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

### Análisis 35

En la tabla 4.35 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 35 y en las figuras 4.115, 4.116 y 4.117 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.35: Características del análisis 35

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

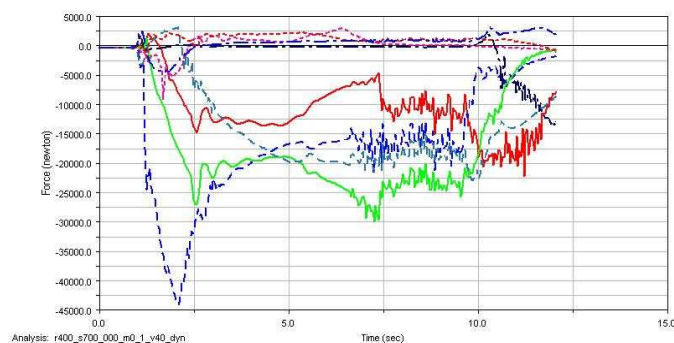


Figura 4.112: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

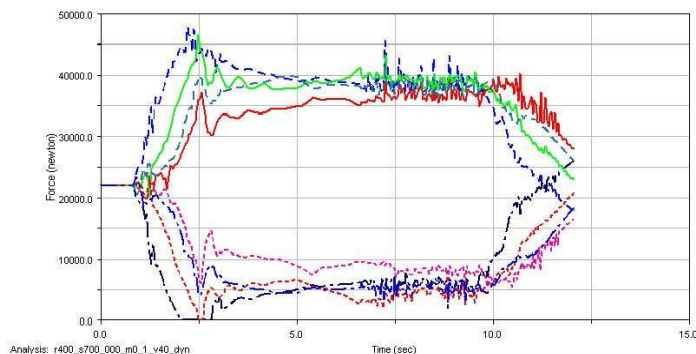


Figura 4.113: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

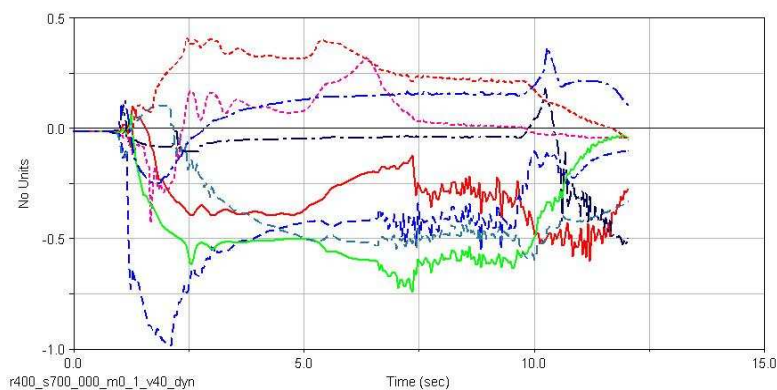


Figura 4.114: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 28 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.98 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.74 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.95 se observa como las ruedas interna delantera del primer bogie (4) e interna trasera del segundo bogie (7) pierden el contacto con el carril durante un periodo de tiempo al principio de la curva.

#### Análisis 36

En la tabla 4.36 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 36 y en las figuras 4.118, 4.119 y 4.120 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.36: Características del análisis 36

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45

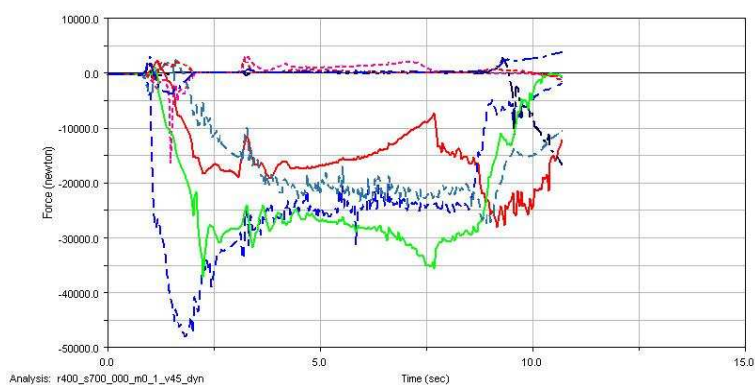
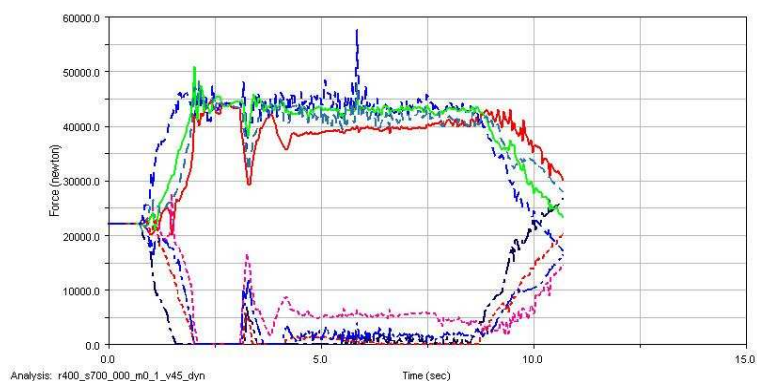
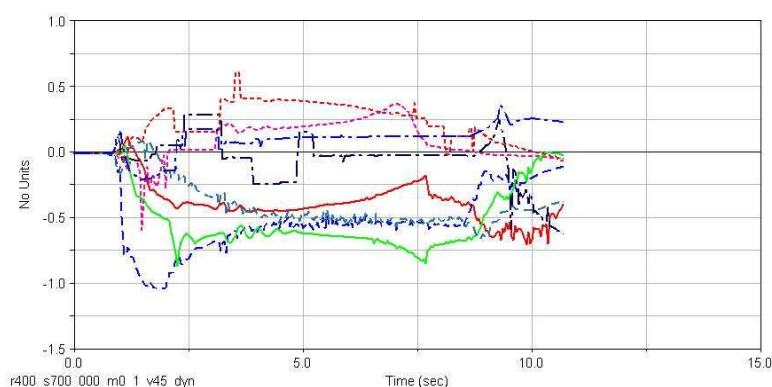


Figura 4.118: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

Figura 4.119: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$ Figura 4.120: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$ 

En el análisis 36 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 1.04 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.86 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. Se puede apreciar en la figura 4.119 que el vagón realiza la trayectoria pero de forma muy inestable, al entrar en la curva las cuatro ruedas internas pierden el contacto con el carril, y durante el transcurso de la curva la rueda interna trasera del segundo bogie (7) y la rueda interna delantera del primer bogie (4), en gran parte del recorrido no tiene contacto con el carril. El momento más crítico se produce cuando la rueda externa delantera del primer bogie (2) obtiene un coef. de desc. de 1.04 durante 0.48 s y las ruedas interna trasera del primer bogie (8) y interna delantera del primer bogie (4) pierden el contacto con el carril, pese a ello, el bogie no descarrila porque la rueda externa trasera del primer bogie (6) se sigue manteniendo en su sitio.

#### Análisis 37

En la tabla 4.37 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 37 y en las figuras 4.121, 4.122 y 4.123 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.37: Características del análisis 37

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	50

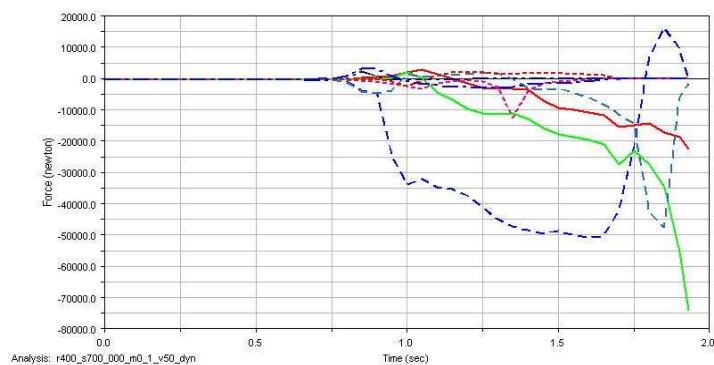


Figura 4.121: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

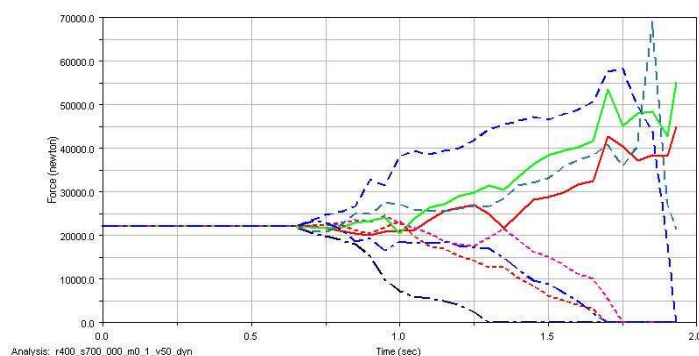


Figura 4.122: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

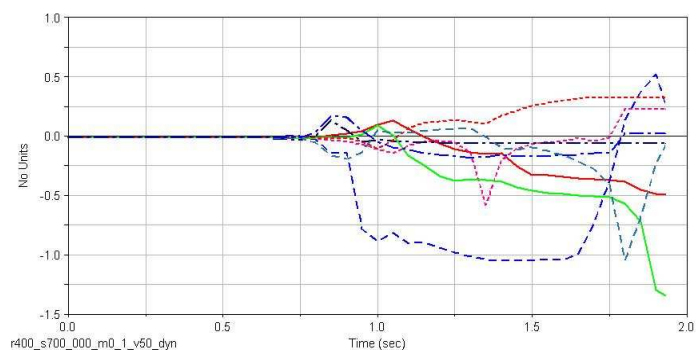


Figura 4.123: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

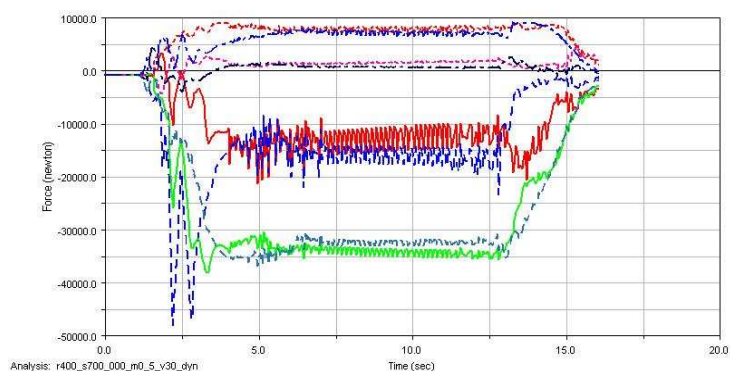
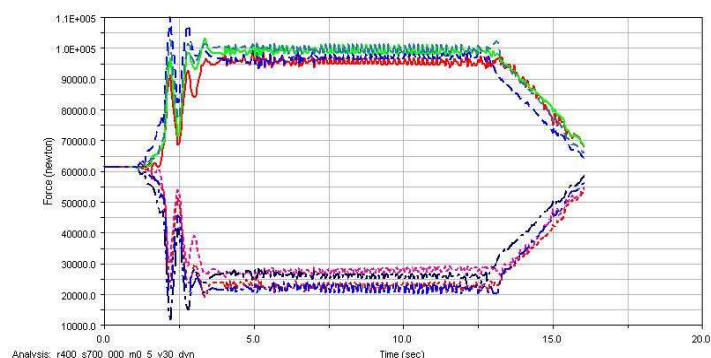
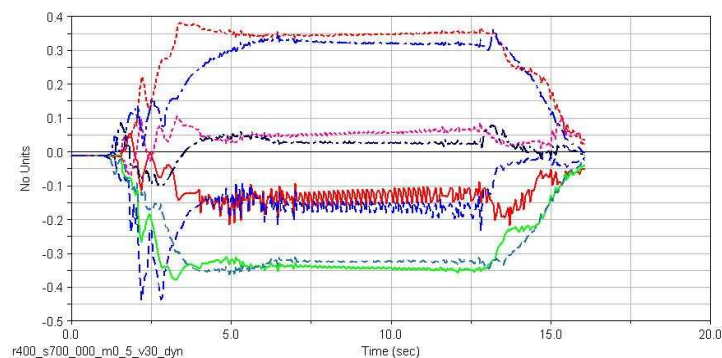
En el análisis 37, el vagón descarrila de la misma forma que en el análisis 2 obteniendo la rueda externa delantera del primer bogie (2) obtiene un coeficiente de descarrilamiento de 1.05 en el momento del descarrile y la rueda externa trasera del primer bogie (6) un valor de coeficiente de descarrilamiento de 1.05.

### Análisis 38

En la tabla 4.38 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 38 y en las figuras 4.124, 4.125 y 4.126 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.38: Características del análisis 38

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

Figura 4.124: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.125: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.126: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ 

En el análisis 38 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.44 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.36 en la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 39

En la tabla 4.39 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 39 y en las figuras 4.127, 4.128 y 4.129 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.39: Características del análisis 39

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

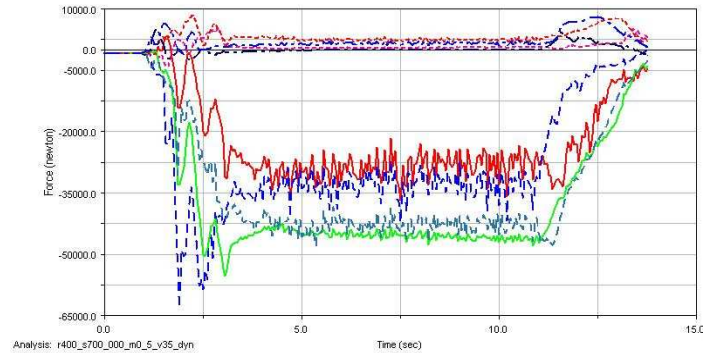


Figura 4.127: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

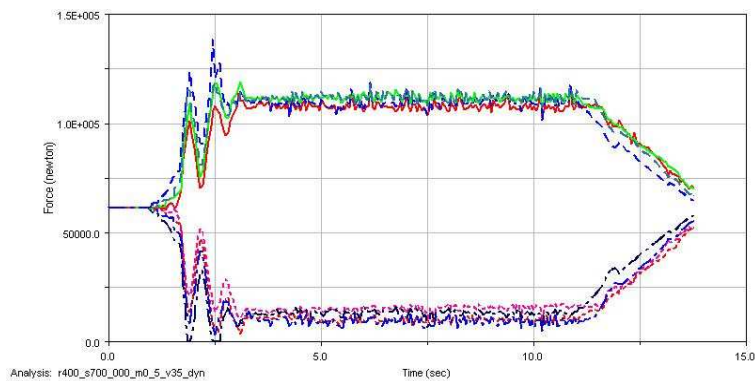


Figura 4.128: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

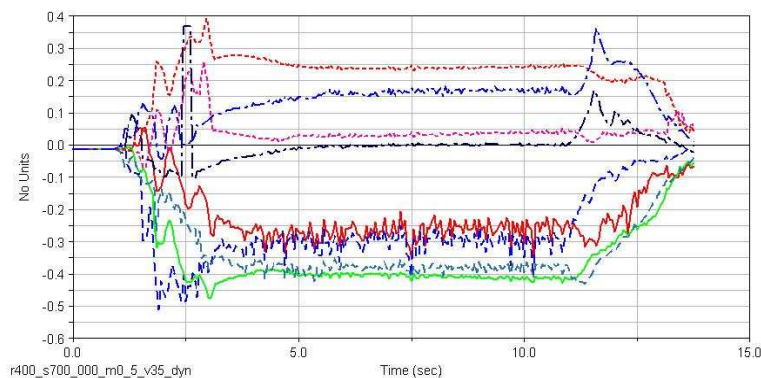


Figura 4.129: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 39 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.51 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.43 en la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva. En la figura 4.128 se observa como la rueda interna delantera del primer bogie (4) pierde el contacto con el carril durante dos periodos de tiempo al principio de la curva.

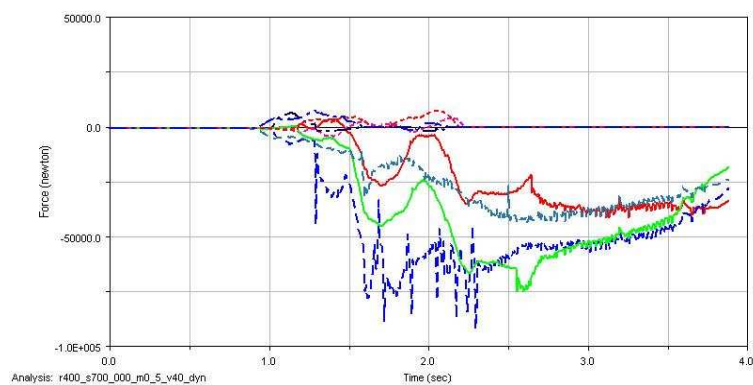
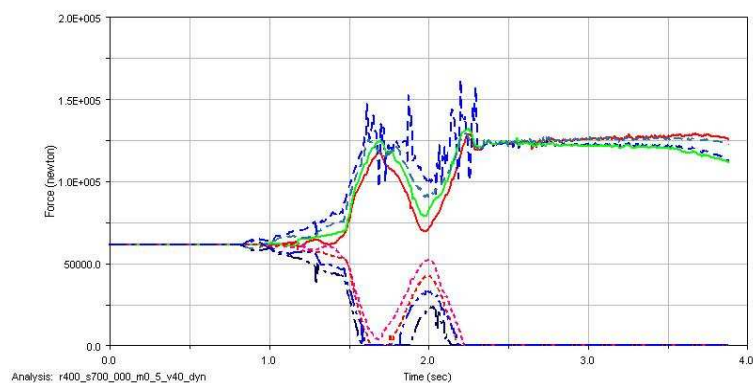
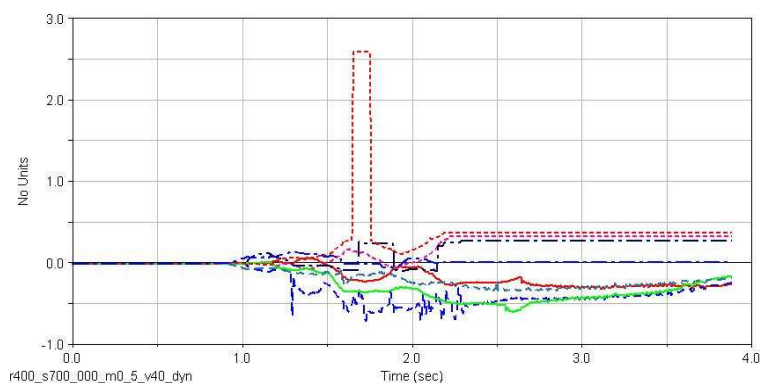
#### Análisis 40

En la tabla 4.40 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 40 y en las figuras 4.130, 4.131 y 4.132 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.



Tabla 4.40: Características del análisis 40

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

Figura 4.130: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$ Figura 4.131: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$ Figura 4.132: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$ 

En el análisis 40 se produce un vuelco en el mismo orden que en el análisis 5.

### Análisis 41

En la tabla 4.41 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 41 y en las figuras 4.133, 4.134 y 4.135 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.41: Características del análisis 41

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

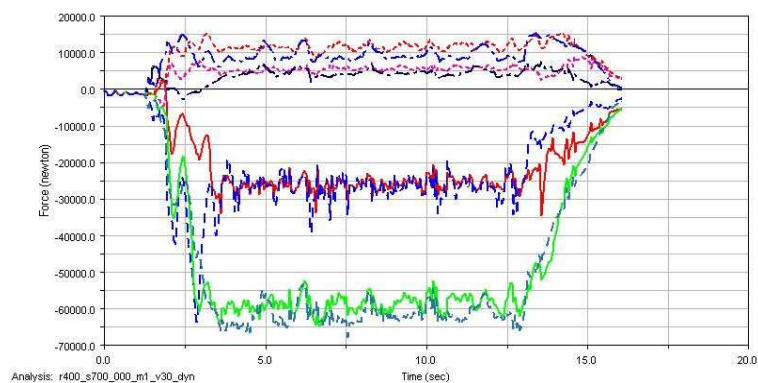


Figura 4.133: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

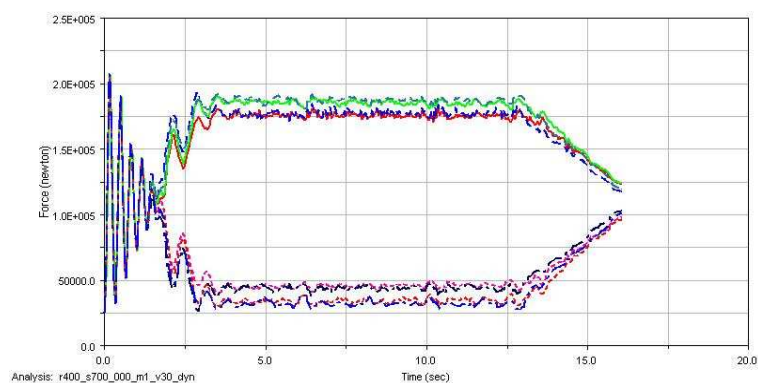


Figura 4.134: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

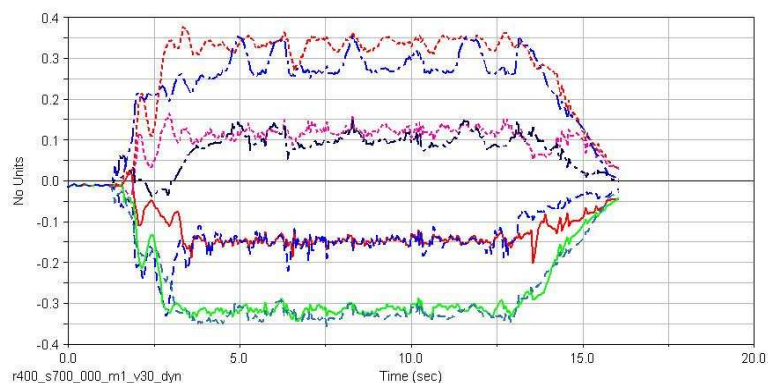


Figura 4.135: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$



En el análisis 41 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.38 para la rueda interna trasera del segundo bogie (7) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 42

En la tabla 4.42 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 42 y en las figuras 4.136, 4.137 y 4.138 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.42: Características del análisis 42

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

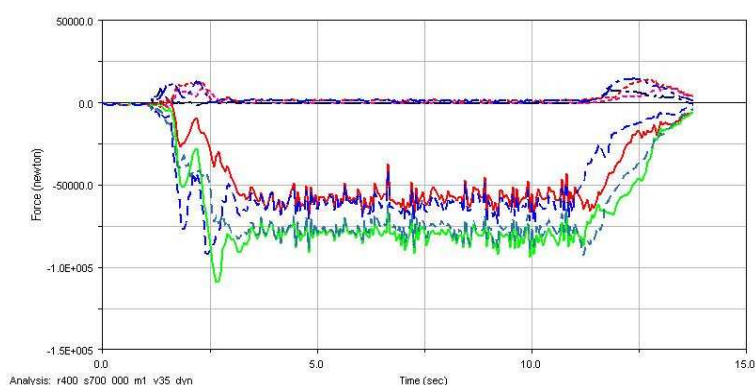


Figura 4.136: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

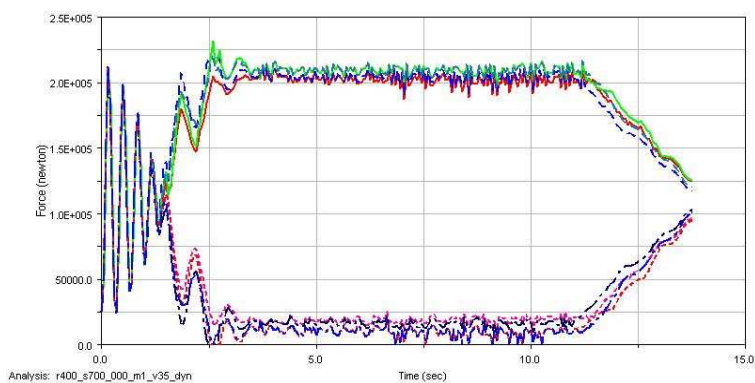


Figura 4.137: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

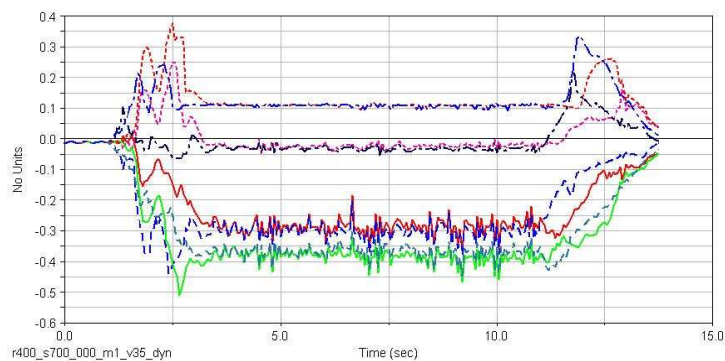


Figura 4.138: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 42 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.51 para la rueda externa trasera del segundo bogie (5) entrando en la curva y un valor máximo de 0.46 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.137 se observa como la fuerza vertical de las ruedas interna delantera del primer bogie (4), interna trasera del segundo bogie (7) e interna trasera del primer bogie (8) llega a 0 solamente en la entrada en la curva.

#### Análisis 43

En la tabla 4.43 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 43 y en las figuras 4.139, 4.140 y 4.141 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.43: Características del análisis 43

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

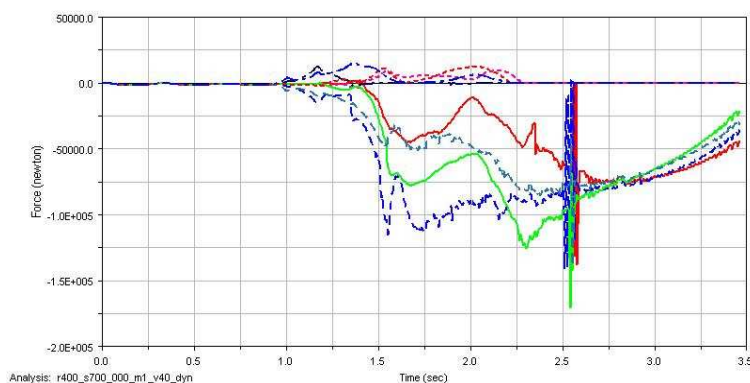


Figura 4.139: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

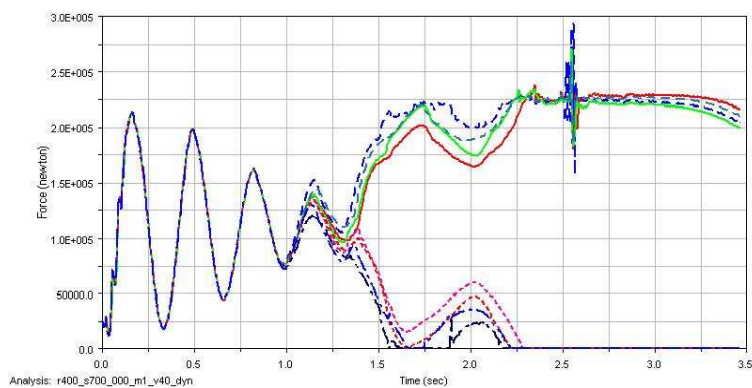


Figura 4.140: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

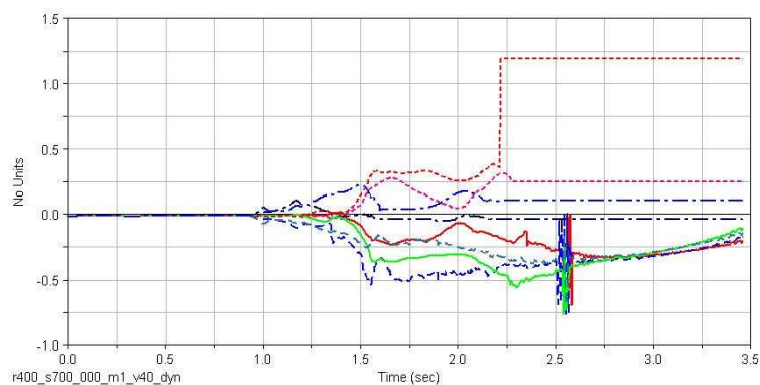


Figura 4.141: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 43 se produce un vuelco en el mismo orden que en el análisis 5.

#### Análisis 44

En la tabla 4.44 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 44 y en las figuras 4.142, 4.143 y 4.144 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.44: Características del análisis 44

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

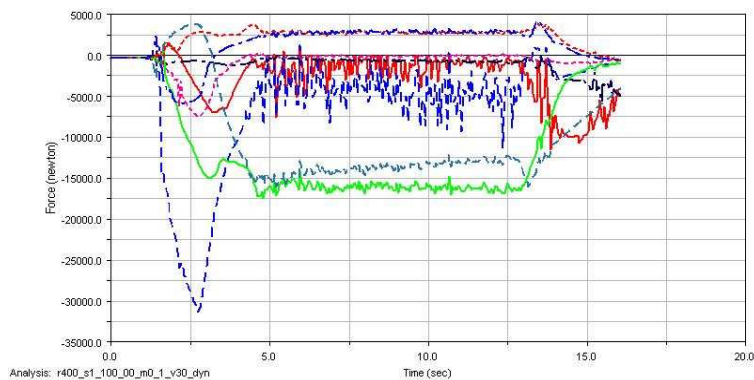


Figura 4.142: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

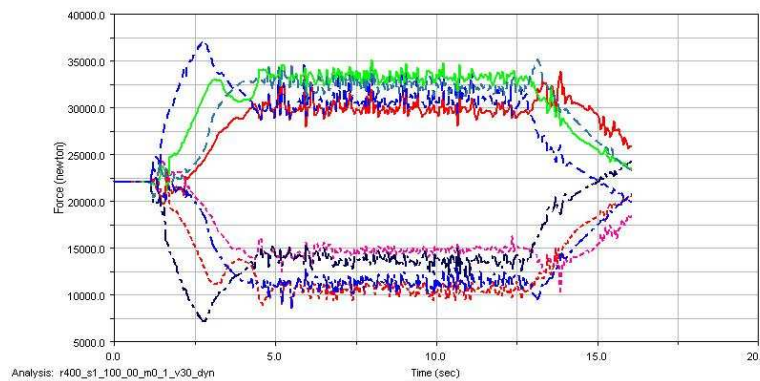
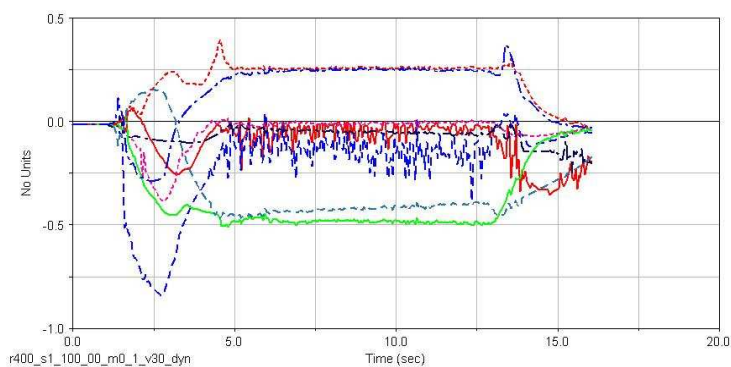


Figura 4.143: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

Figura 4.144: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ 

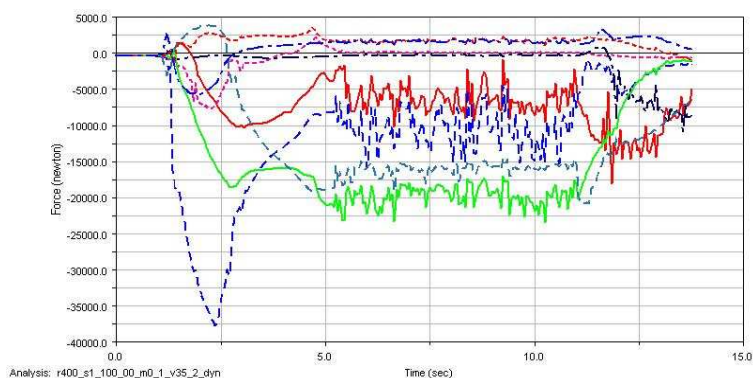
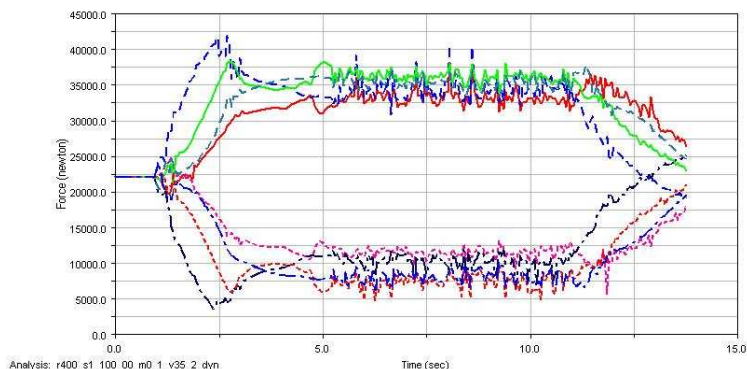
En el análisis 44 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.84 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.51 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

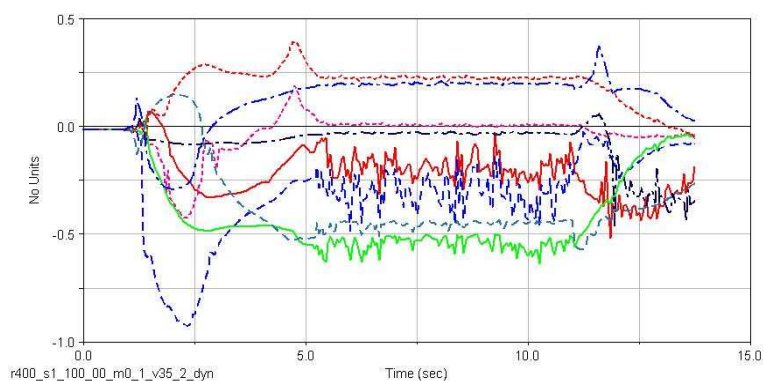
#### Análisis 45

En la tabla 4.45 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 45 y en las figuras 4.145, 4.146 y 4.147 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.45: Características del análisis 45

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

Figura 4.145: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ Figura 4.146: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

Figura 4.147: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ 

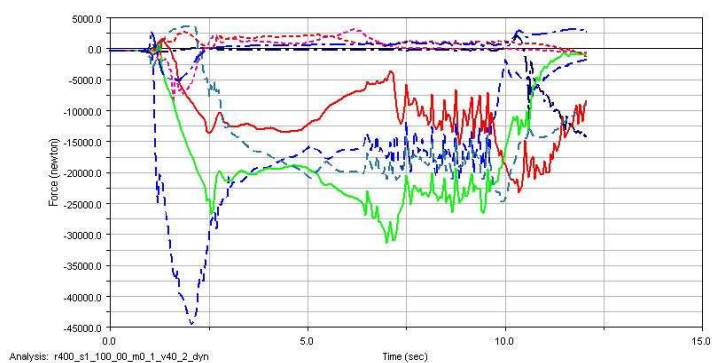
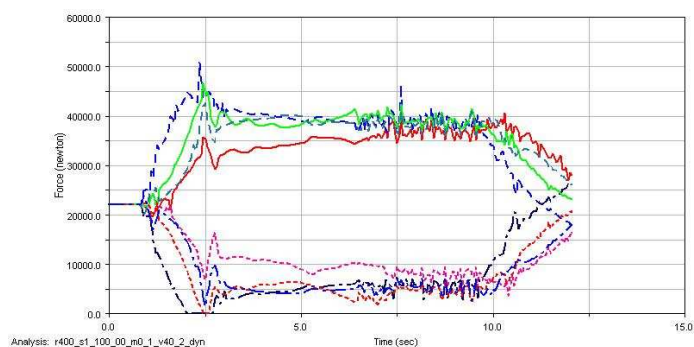
En el análisis 45 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.92 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.63 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 46

En la tabla 4.46 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 46 y en las figuras 4.148, 4.149 y 4.150 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.46: Características del análisis 46

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

Figura 4.148: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$ Figura 4.149: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

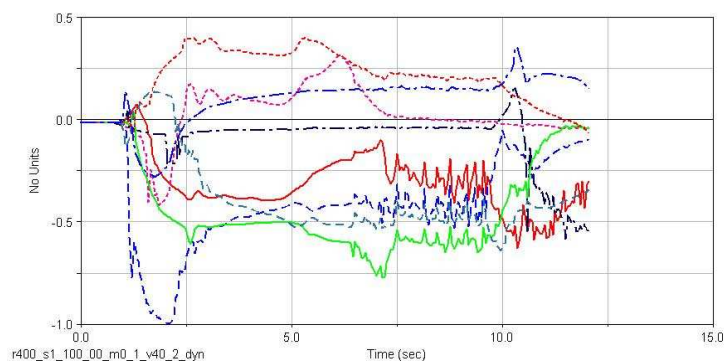


Figura 4.150: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 46 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.99 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.77 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.137 se observa como la fuerza vertical de las ruedas interna delantera del primer bogie (4) e interna trasera del segundo bogie (7) llega a 0 solamente en la entrada en la curva por lo que en ese tiempo pierden el contacto con el carril.

#### Análisis 47

En la tabla 4.47 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 47 y en las figuras 4.151, 4.152 y 4.153 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.47: Características del análisis 47

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45

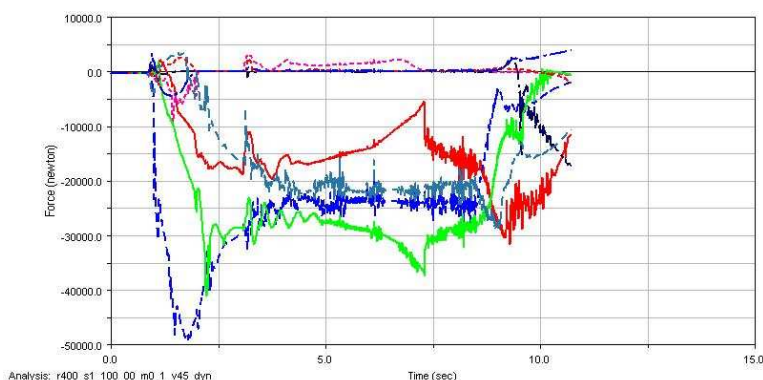
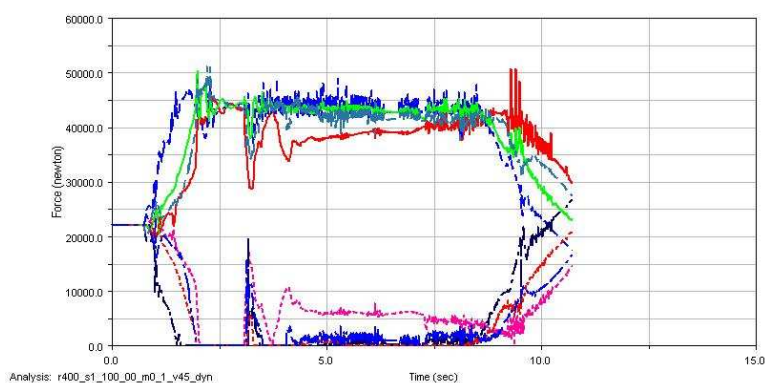
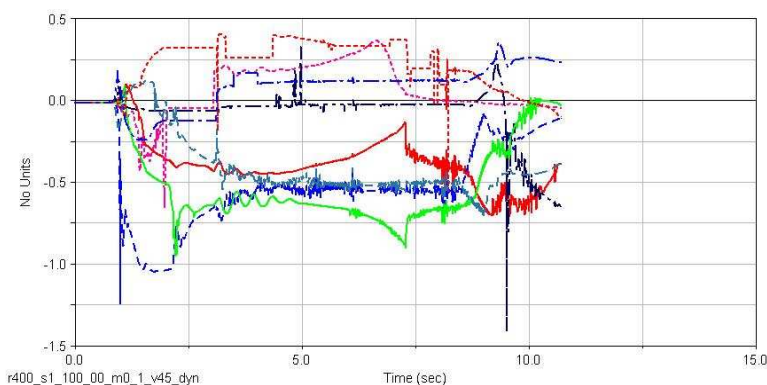


Figura 4.151: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$



Figura 4.152: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$ Figura 4.153: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$ 

En el análisis 47 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 1.24 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva, un valor máximo de 0.95 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva y un valor máximo de 1.41 en la rueda interna delantera del primer bogie (4) en el transcurso final de la curva al estabilizarse el vagón en la recta. Se puede apreciar en la figura 4.152 que el vagón realiza el trayecto pero de forma muy inestable, al entrar en la curva las cuatro ruedas internas pierden el contacto con el carril, y durante el transcurso de la curva la rueda interna trasera del segundo bogie (7) y la rueda interna delantera del primer bogie (4) en gran parte del recorrido no tiene contacto con el carril. El momento más crítico se produce cuando la rueda externa delantera del primer bogie (2) obtiene un coeficiente de descarrilamiento de 1.05 durante 0.5 s y las ruedas interna trasera del primer bogie (8) y interna delantera del primer bogie (4) pierden el contacto con el carril, pese a ello, el bogie no descarrila porque la rueda externa trasera del primer bogie (6) se sigue manteniendo en su sitio.

#### Análisis 48

En la tabla 4.48 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 48 y en las figuras 4.154, 4.155 y 4.156 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.48: Características del análisis 48

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	50

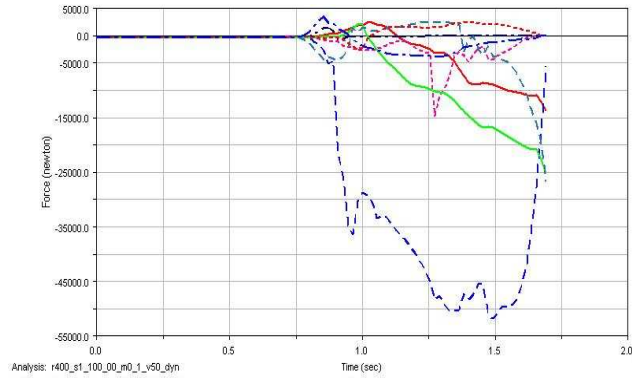


Figura 4.154: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

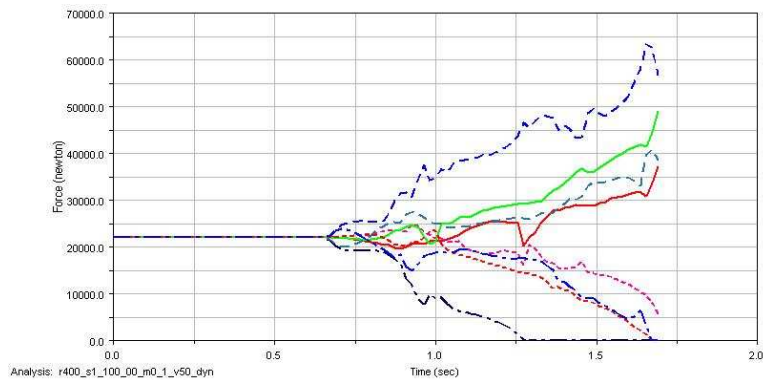


Figura 4.155: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

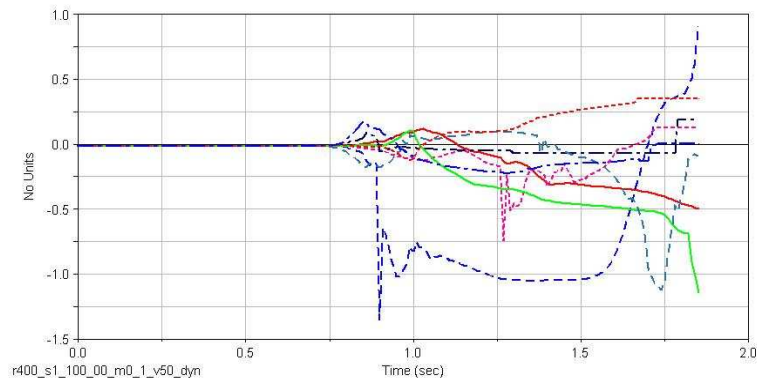


Figura 4.156: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

En el análisis 48 el vagón descarrila de la misma forma que en el análisis 2 obteniendo la rueda externa delantera del primer bogie (2) obtiene un coeficiente de descarrilamiento máximo de 1.35 y de 1.05 en el momento del descarrile y la rueda externa trasera del primer bogie (6) un valor de coeficiente de descarrilamiento de 1.2.

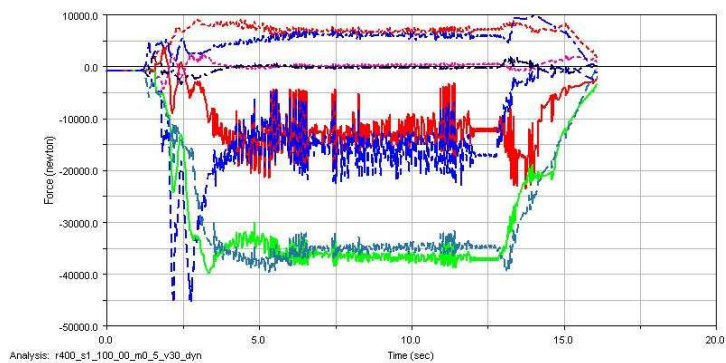
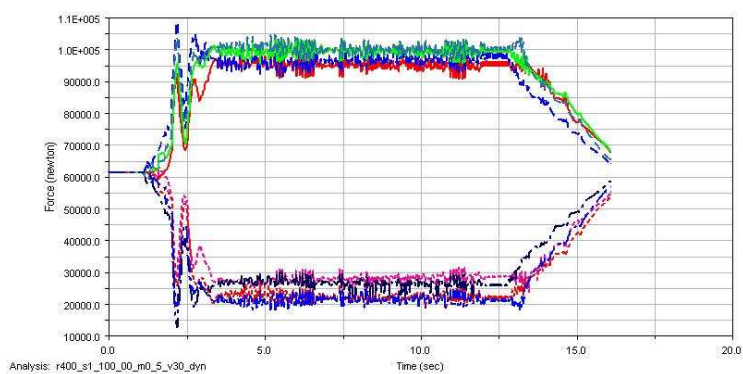
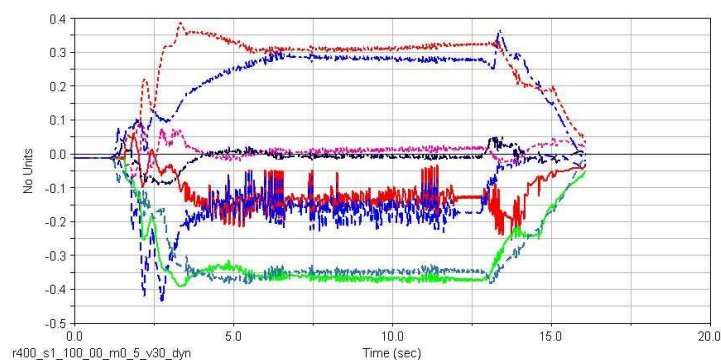
#### Análisis 49

En la tabla 4.49 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 49 y en las figuras 4.157, 4.158 y 4.159 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.



Tabla 4.49: Características del análisis 49

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

Figura 4.157: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.158: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.159: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ 

En el análisis 45 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.44 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.38 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

### Análisis 50

En la tabla 4.50 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 50 y en las figuras 4.160, 4.161 y 4.162 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.50: Características del análisis 50

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

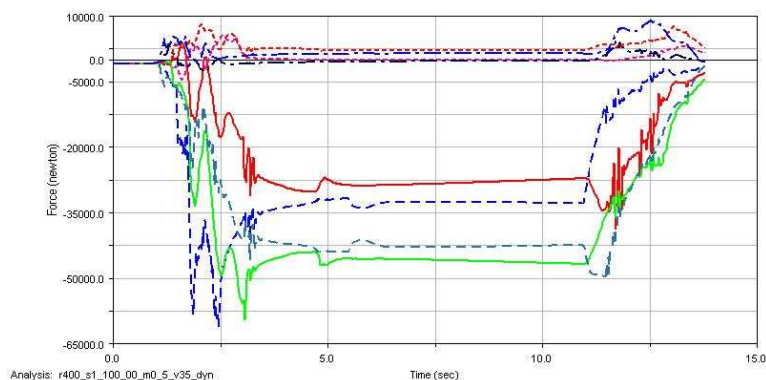


Figura 4.160: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

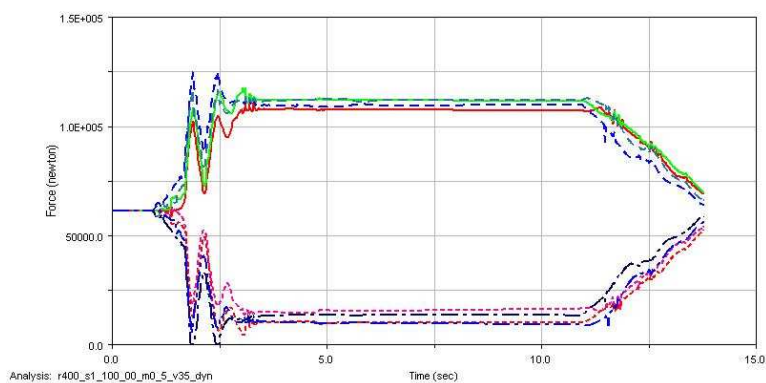


Figura 4.161: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

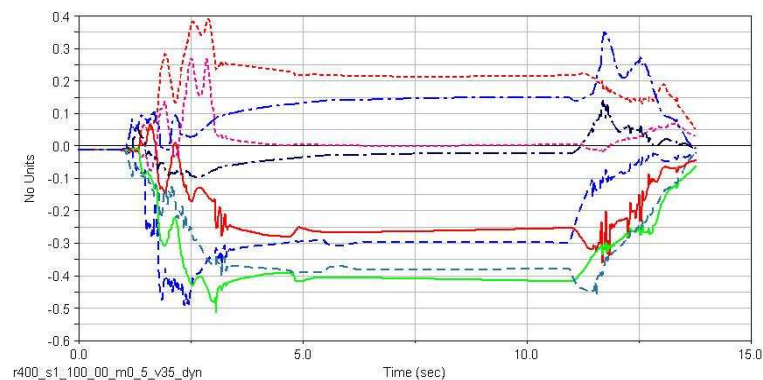


Figura 4.162: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 50 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.51 para la rueda externa trasera del segundo bogie (5) entrando en la curva y un valor máximo de 0.42 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. Al salir de la curva la rueda externa trasera del primer bogie (6) obtiene un coeficiente de descarrilamiento de 0.46. En la figura 4.161 se observa como la rueda interna delantera del primer bogie (4) pierde el contacto con el carril durante dos periodos de tiempo al principio de la curva.

#### Análisis 51

En la tabla 4.51 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 51 y en las figuras 4.163, 4.164 y 4.165 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.51: Características del análisis 51

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

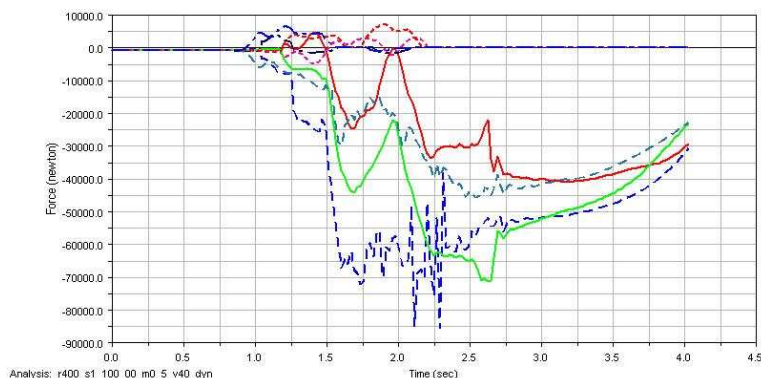


Figura 4.163: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

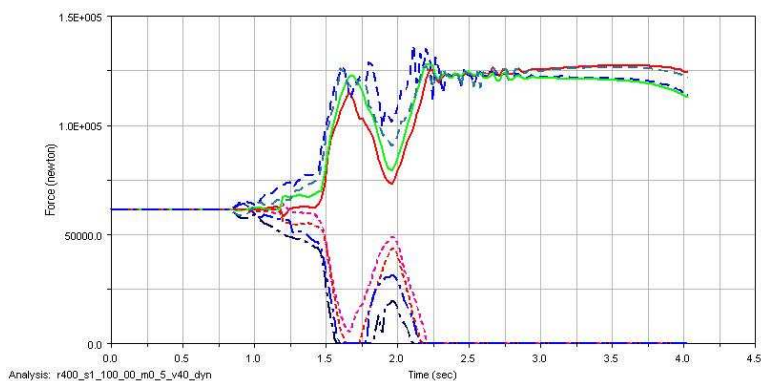


Figura 4.164: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

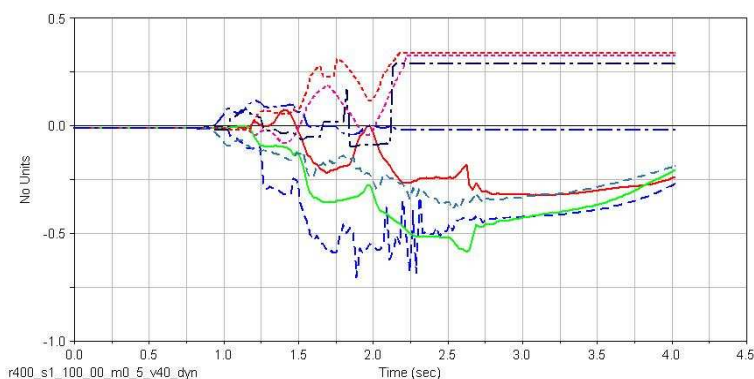


Figura 4.165: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 51 se produce un vuelco en el mismo orden que en el análisis 5.

### Análisis 52

En la tabla 4.52 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 52 y en las figuras 4.166, 4.167 y 4.168 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.52: Características del análisis 52

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

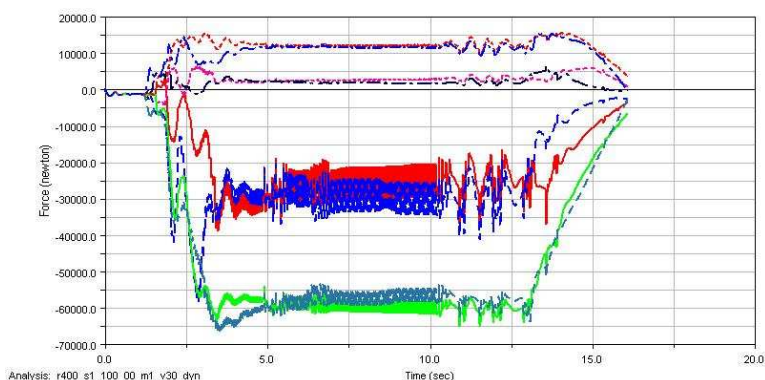


Figura 4.166: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

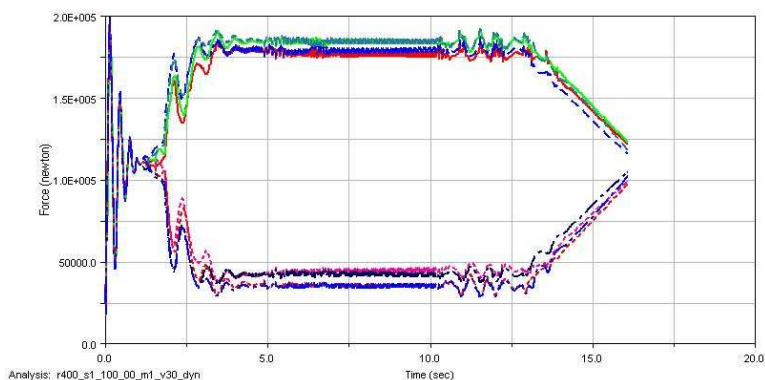


Figura 4.167: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

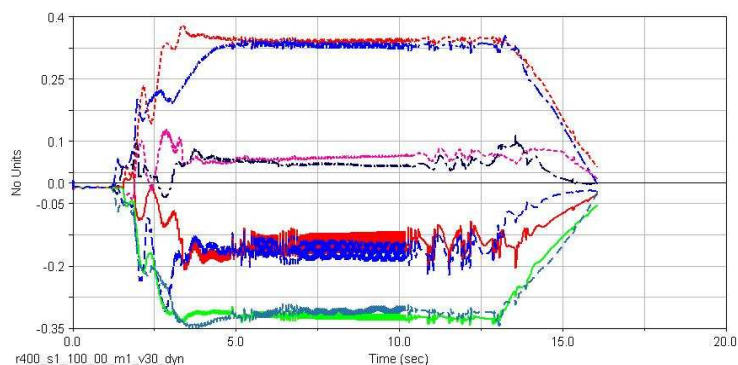


Figura 4.168: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

En el análisis 52 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.38 para la rueda interna trasera del segundo bogie (7) al entrar en la curva y de 0.35 para la rueda interna trasera del segundo bogie (7) en el transcurso de la curva.

### Análisis 53

En la tabla 4.53 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 53 y en las figuras 4.169, 4.170 y 4.171 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.53: Características del análisis 53

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

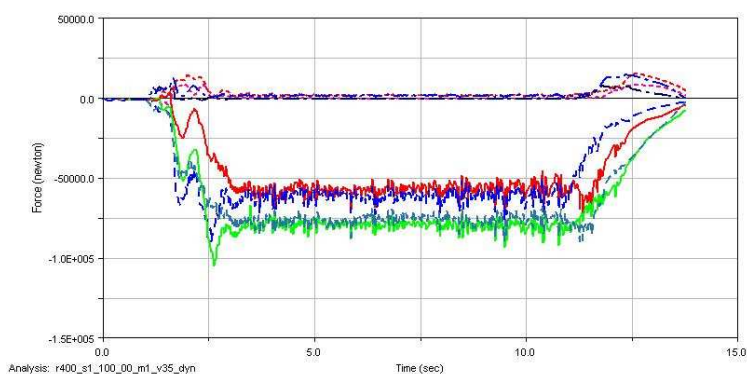


Figura 4.169: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

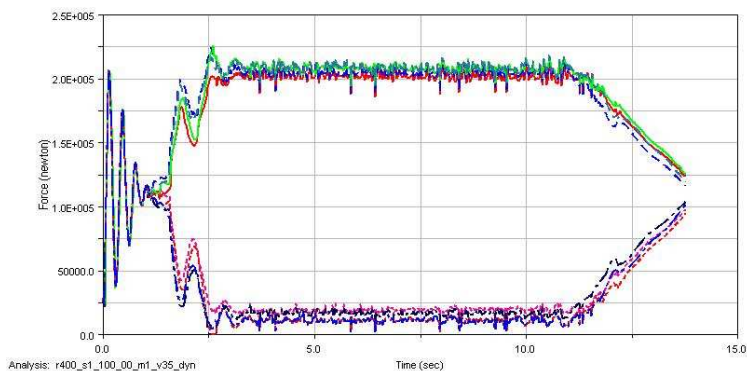


Figura 4.170: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

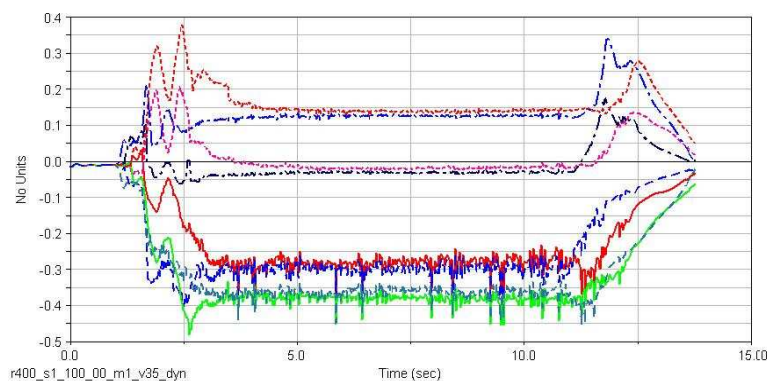


Figura 4.171: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 53 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.48 para la rueda externa trasera del segundo bogie (5) entrando en la curva y un valor máximo de 0.45 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.170 se observa como las ruedas interna delantera del primer bogie (4) e interna trasera del segundo bogie (7) pierden el contacto con el carril durante un periodo de tiempo al principio de la curva.

#### Análisis 54

En la tabla 4.54 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 54 y en las figuras 4.172, 4.173 y 4.174 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.54: Características del análisis 54

<b>Radio de la curva (m)</b>	400	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

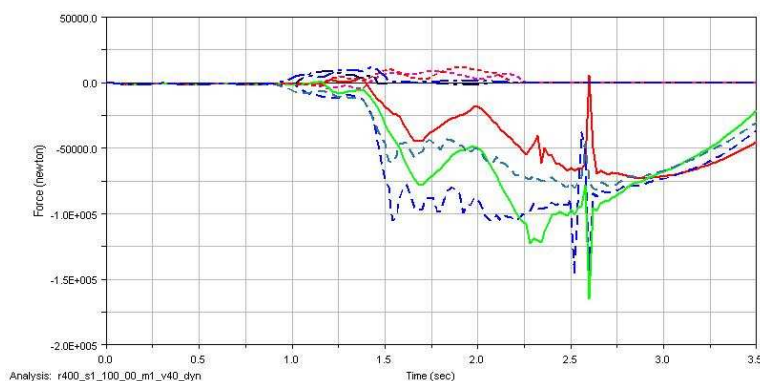


Figura 4.172: Fuerza lateral  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$



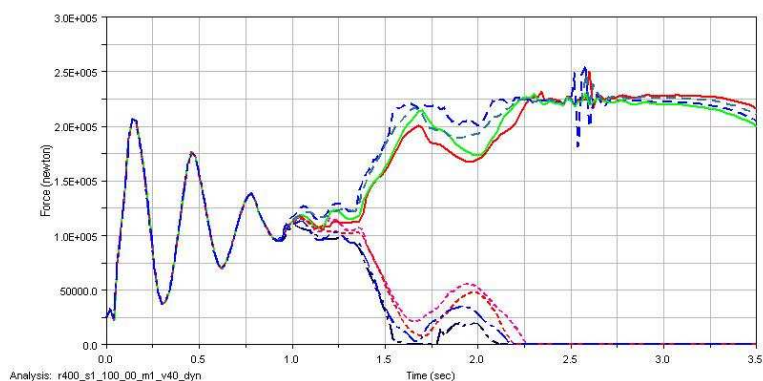


Figura 4.173: Fuerza vertical  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

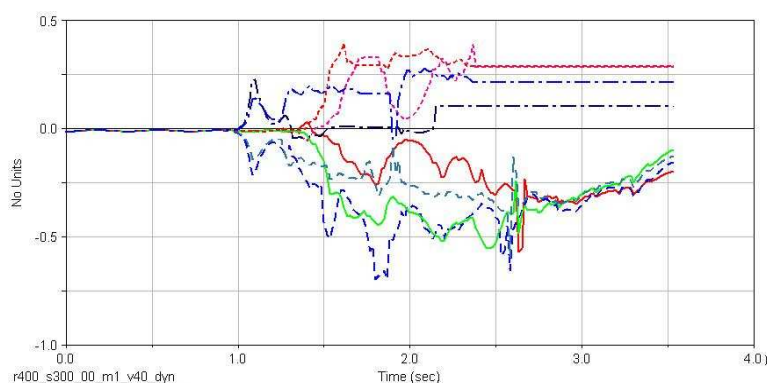


Figura 4.174: Coef. Desc  $r=400\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 54, el vagón sufre un vuelco en el mismo orden que en el análisis 14.

#### Análisis 55

En la tabla 4.55 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 55 y en las figuras 4.175, 4.176 y 4.177 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.55: Características del análisis 55

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

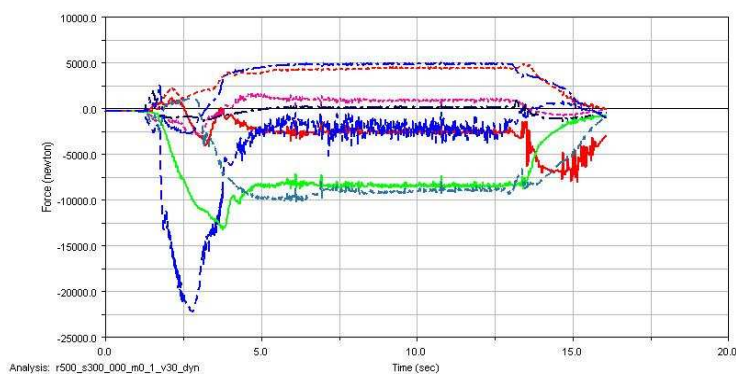
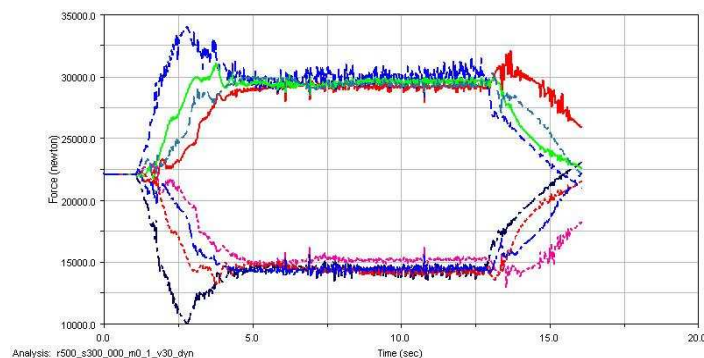
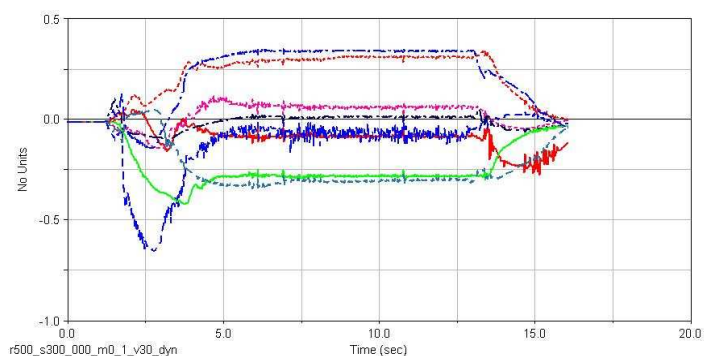


Figura 4.175: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

Figura 4.176: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.177: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ 

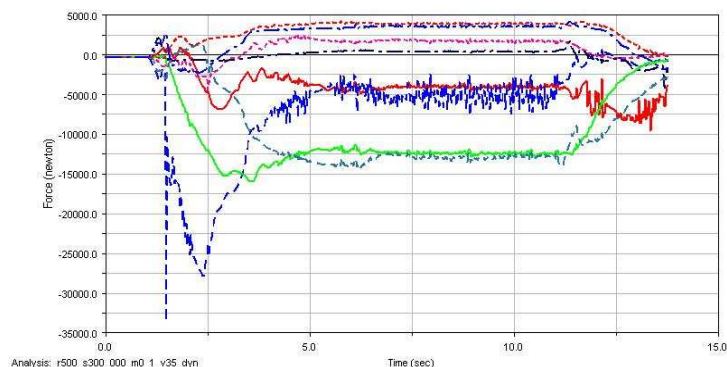
En el análisis 55 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.65 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.35 en la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 56

En la tabla 4.56 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 56 y en las figuras 4.178, 4.179 y 4.180 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.56: Características del análisis 56

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

Figura 4.178: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$



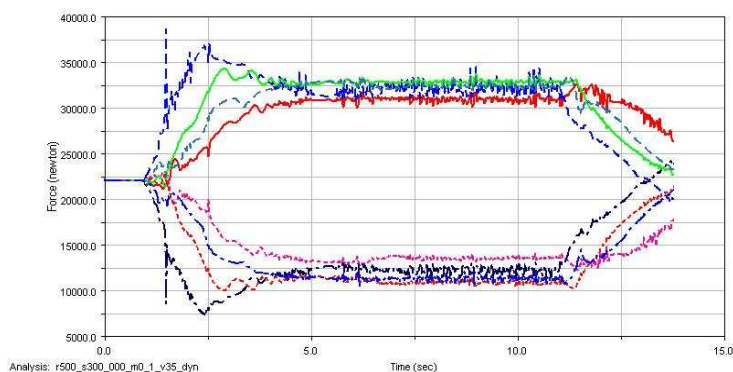


Figura 4.179: Fuerza vertical r=500m; k=100000N/m; m=4000kg; v=35m/s

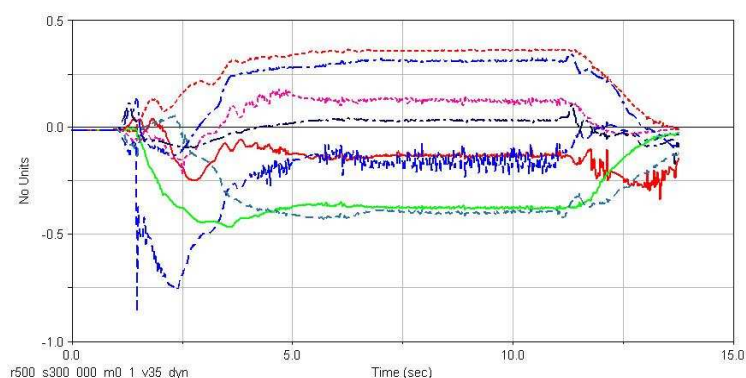


Figura 4.180: Coef. Desc r=500m; k=100000N/m; m=4000kg; v=35m/s

En el análisis 56 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.87 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.43 en la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 57

En la tabla 4.57 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 57 y en las figuras 4.181, 4.182 y 4.183 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.57: Características del análisis 57

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

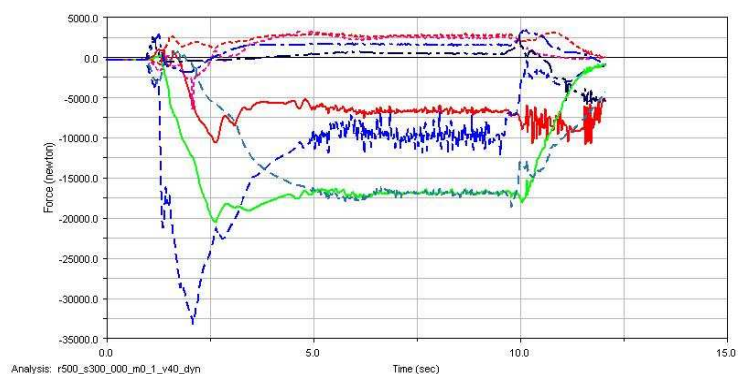


Figura 4.181: Fuerza lateral r=500m; k=100000N/m; m=4000kg; v=40m/s

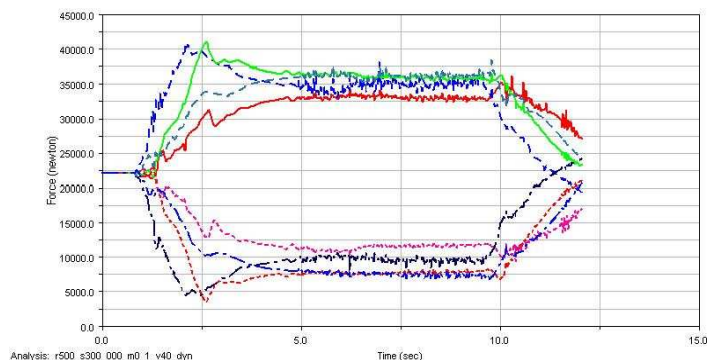


Figura 4.182: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

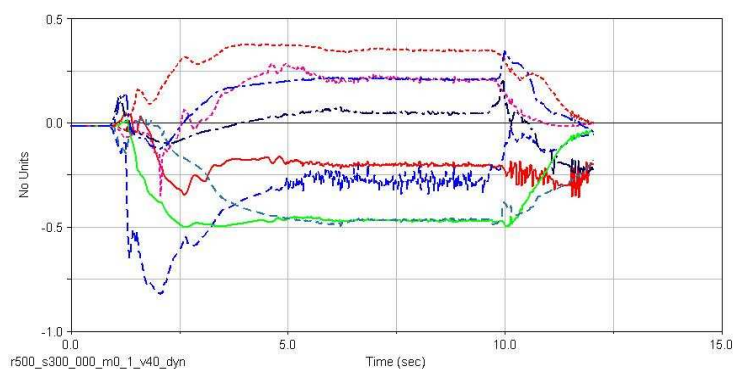


Figura 4.183: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 57 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.82 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.49 en la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 58

En la tabla 4.58 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 58 y en las figuras 4.184, 4.185 y 4.186 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.58: Características del análisis 58

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45

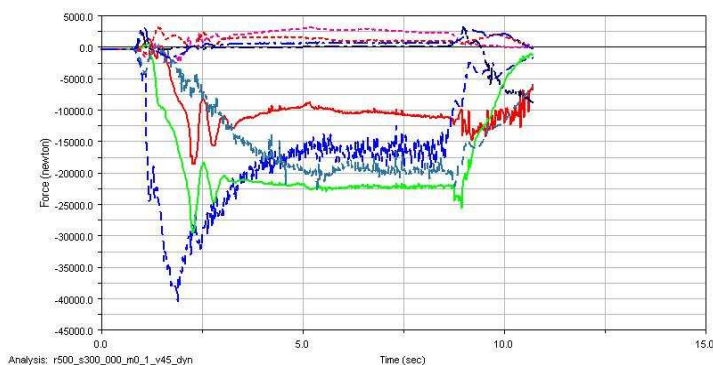


Figura 4.181: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

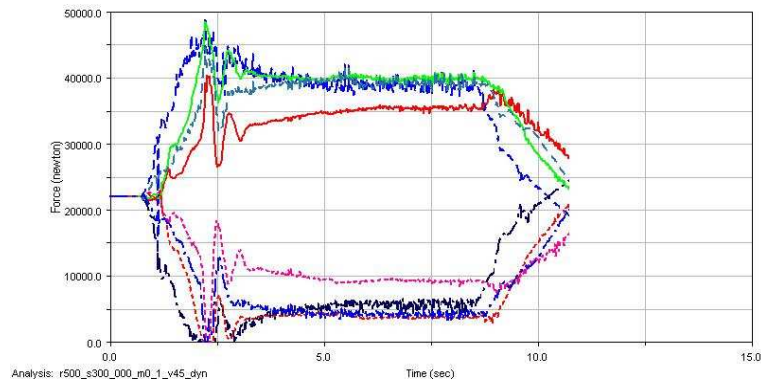


Figura 4.182: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

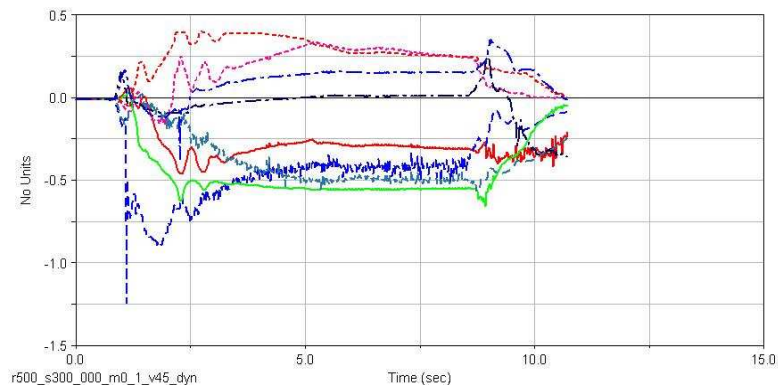


Figura 4.183: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

En el análisis 58 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 1.24 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.56 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.182 se observa como la fuerza vertical de las ruedas interiores llega a 0 solamente en la entrada en la curva por lo que en ese tiempo pierden el contacto con el carril.

#### Análisis 59

En la tabla 4.59 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 59 y en las figuras 4.187, 4.188 y 4.189 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.59: Características del análisis 59

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	50

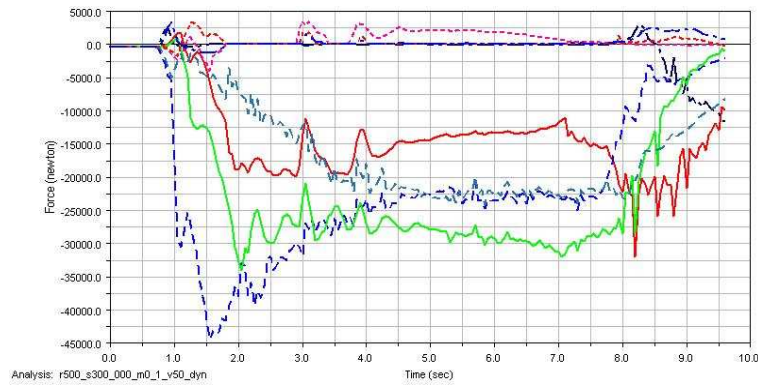


Figura 4.187: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

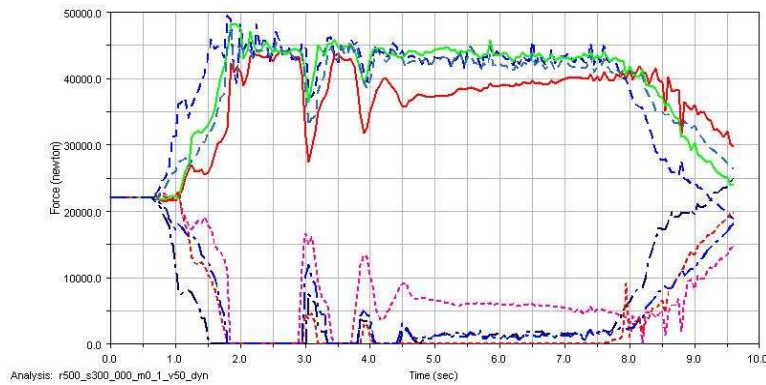


Figura 4.188: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

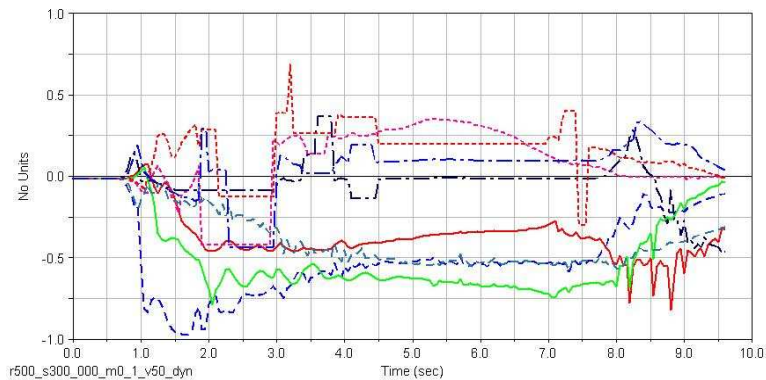


Figura 4.189: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

En el análisis 59 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.98 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.74 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. Se puede apreciar en la figura 4.187 que el vagón realiza la trayectoria pero de forma muy inestable, al entrar en la curva las cuatro ruedas internas pierden el contacto con el carril, y durante el transcurso de la curva la rueda interna trasera del segundo bogie (7) en gran parte del recorrido no tiene contacto con el carril.

### Análisis 60

En la tabla 4.60 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 60 y en las figuras 4.190, 4.191 y 4.192 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.60: Características del análisis 60

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

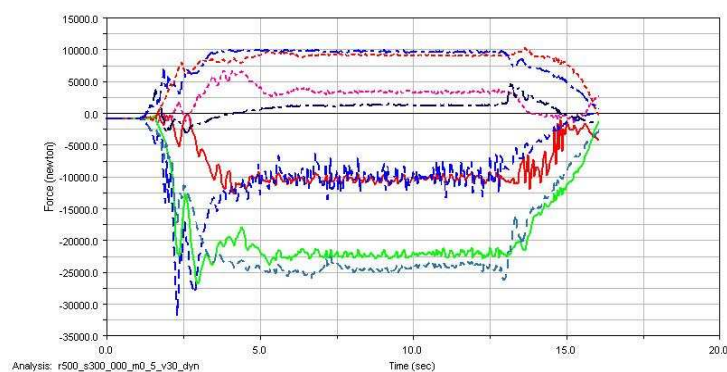


Figura 4.190: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

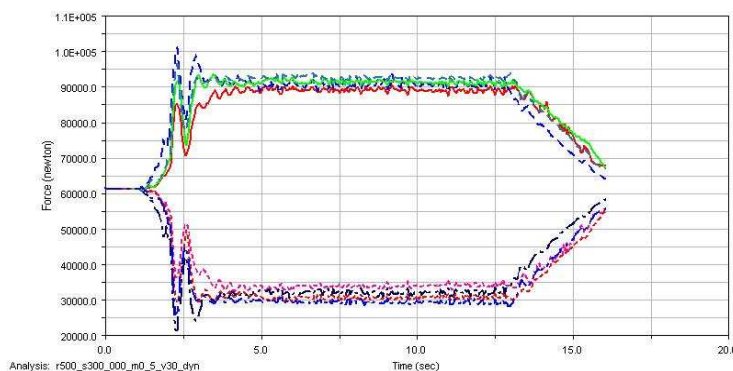


Figura 4.191 Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

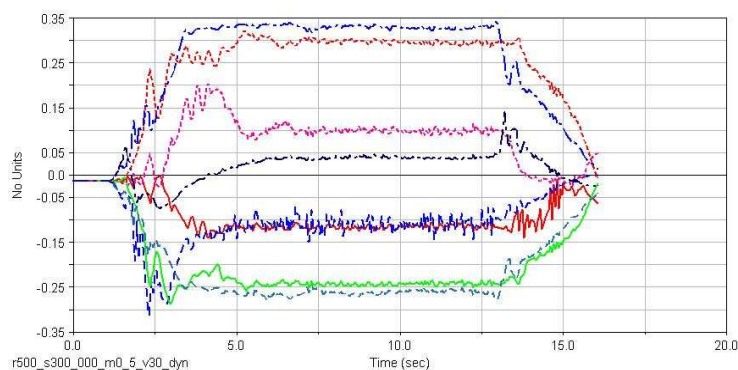


Figura 4.192: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$



En el análisis 60 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.33 para la rueda interna trasera del primer bogie (8) entrando en la curva y un valor máximo de 0.34 en la rueda interna trasera del primer bogie (8) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 61

En la tabla 4.61 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 61 y en las figuras 4.193, 4.194 y 4.195 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.61: Características del análisis 61

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

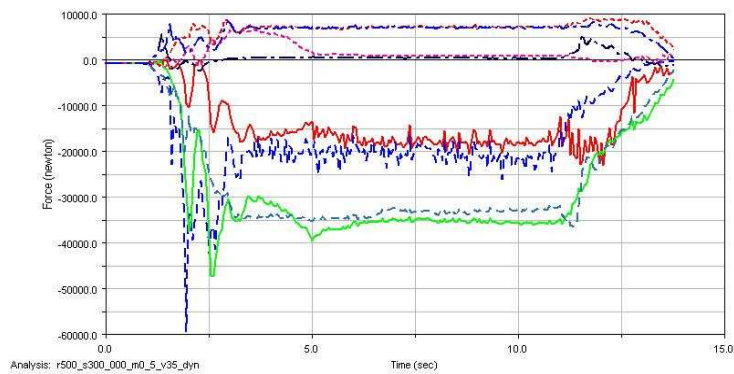


Figura 4.193: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

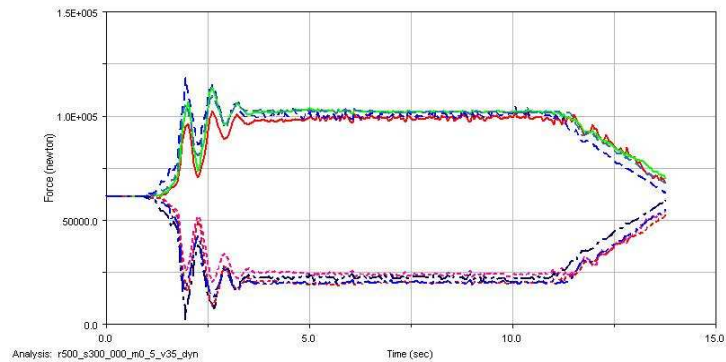


Figura 4.194: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

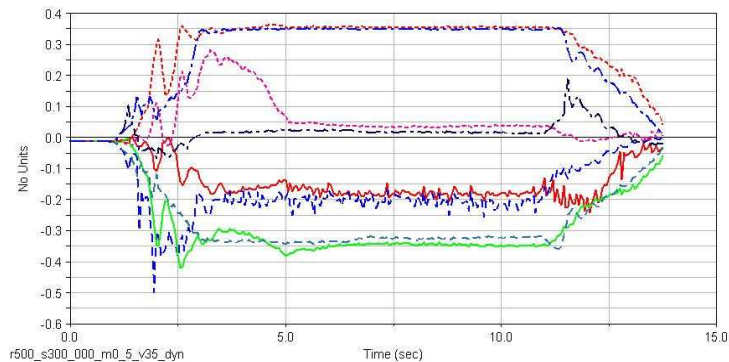


Figura 4.195: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 61 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.50 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.42 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 62

En la tabla 4.62 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 62 y en las figuras 4.196, 4.197 y 4.198 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.62: Características del análisis 62

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

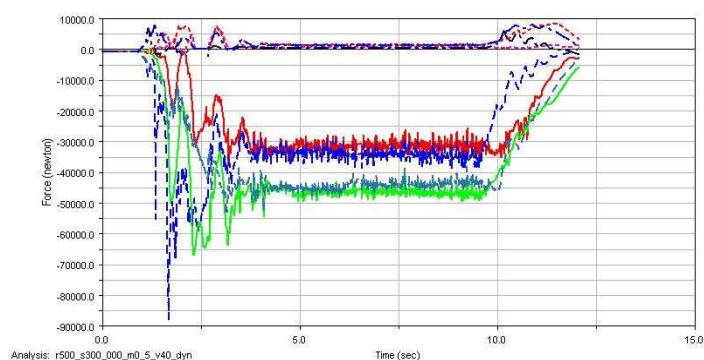


Figura 4.196: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

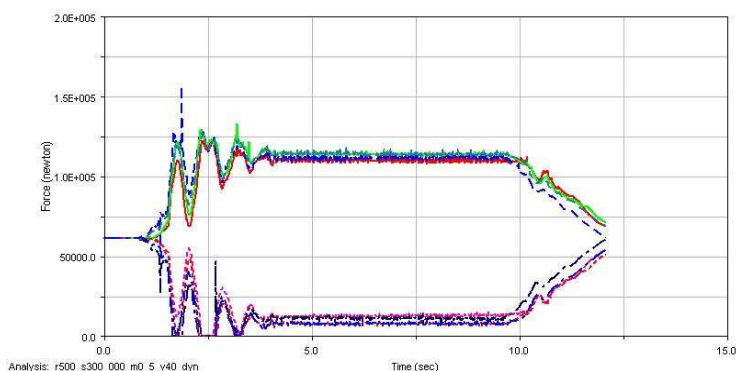


Figura 4.197: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

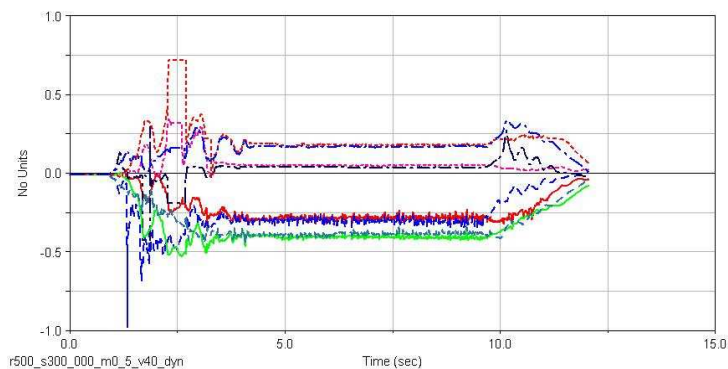


Figura 4.198: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 62 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.98 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.47 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.197 se observa como la fuerza vertical de las ruedas interiores llega a 0 en la entrada en la curva en tres ocasiones por lo que en ese tiempo pierden el contacto con el carril.

### Análisis 63

En la tabla 4.63 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 63 y en las figuras 4.199, 4.200 y 4.201 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.63: Características del análisis 63

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45

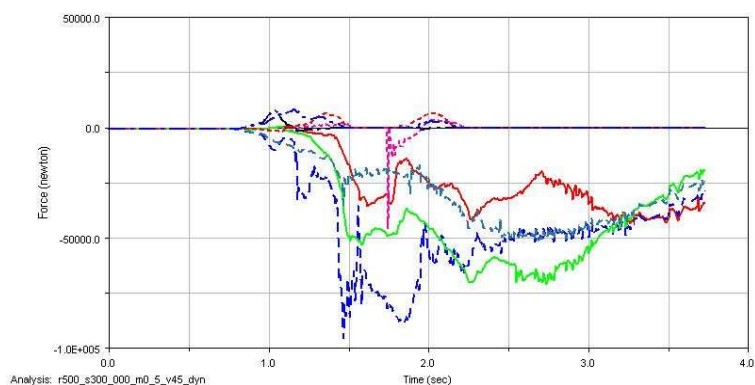


Figura 4.199: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

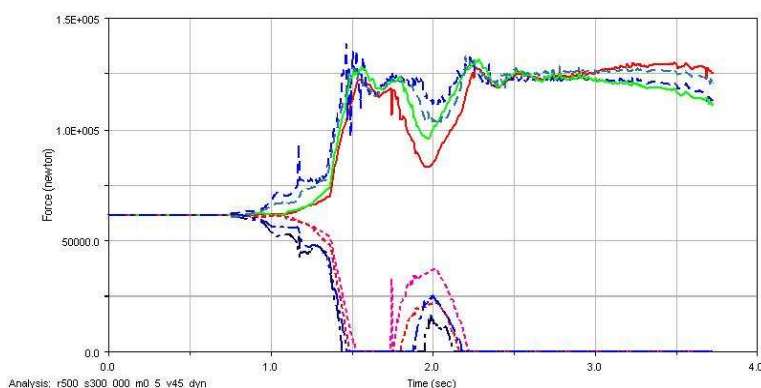


Figura 4.200: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$



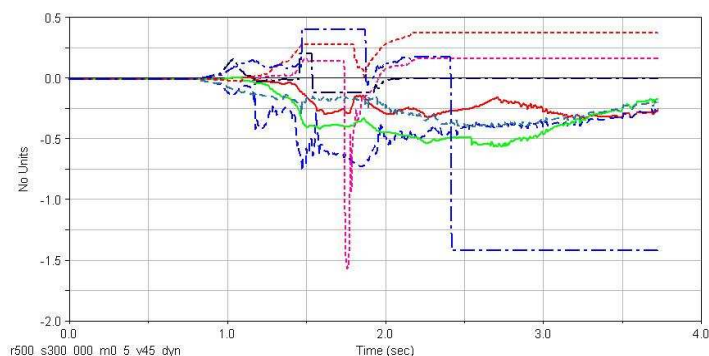


Figura 4.201: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

Las ruedas internas dejan de tener contacto entrando en la curva, tras recuperarlo, lo vuelven a perder permanentemente en el mismo orden que en el análisis 32 produciéndose el vuelco del vagón.

#### Análisis 64

En la tabla 4.64 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 64 y en las figuras 4.202, 4.203 y 4.204 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.64: Características del análisis 64

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

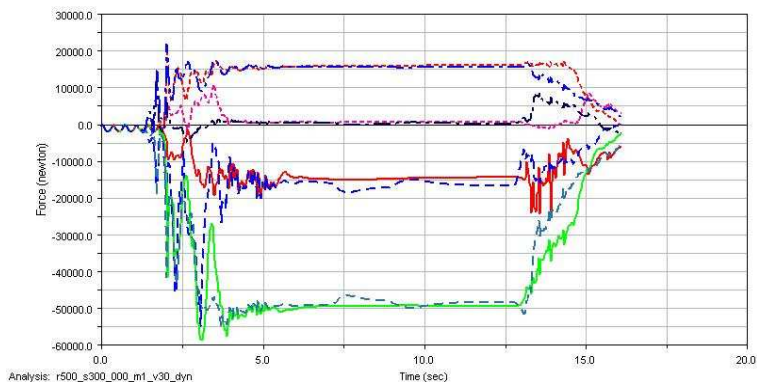


Figura 4.202: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

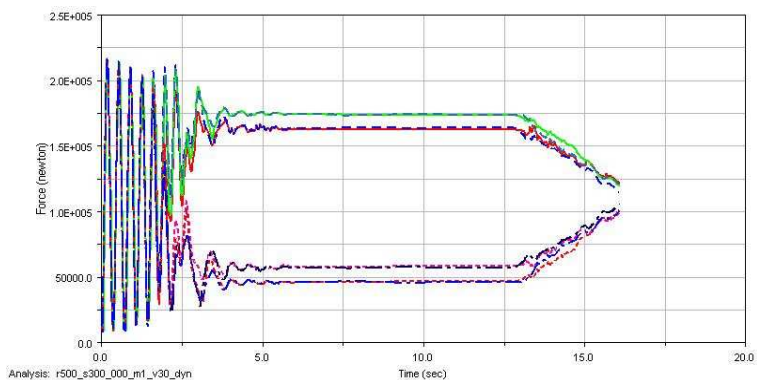
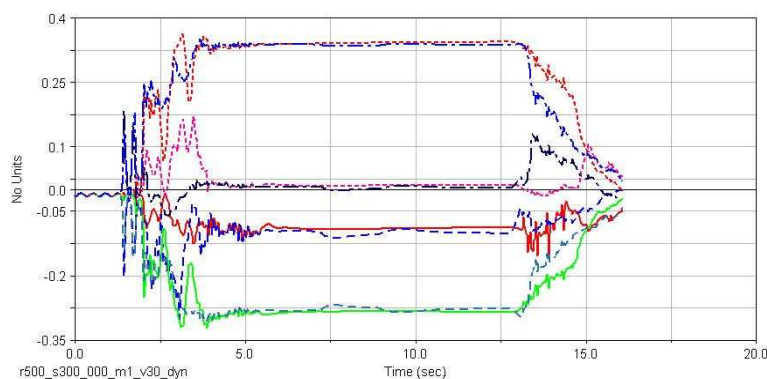


Figura 4.203: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

Figura 4.204: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ 

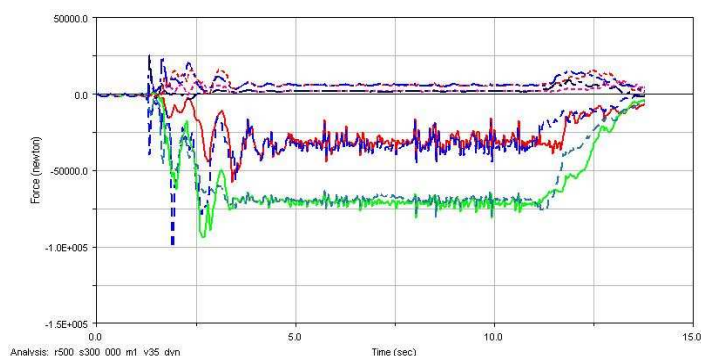
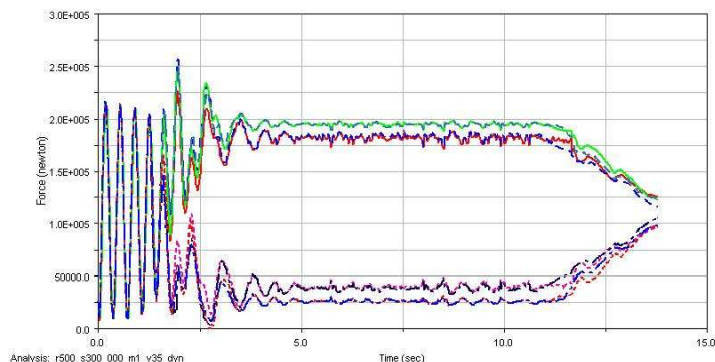
En el análisis 64 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.36 para la rueda interna trasera del segundo bogie (7) entrando en la curva y un valor máximo de 0.34 en la rueda interna trasera del segundo bogie (7) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 65

En la tabla 4.65 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 65 y en las figuras 4.205, 4.206 y 4.207 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.65: Características del análisis 65

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

Figura 4.205: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ Figura 4.206: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

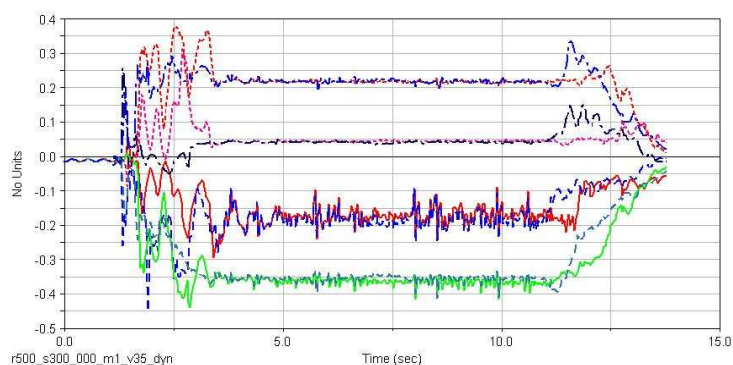


Figura 4.207: Coef. Desc r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=35m/s

En el análisis 65 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.45 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.42 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 66

En la tabla 4.66 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 66 y en las figuras 4.208, 4.209 y 4.210 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.66: Características del análisis 66

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

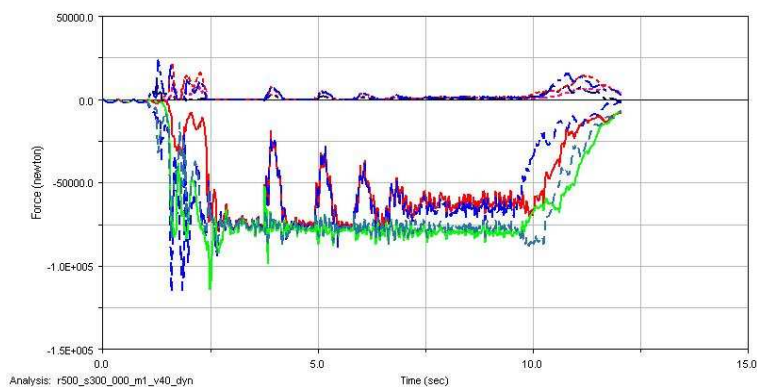


Figura 4.208: Fuerza lateral r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=40m/s

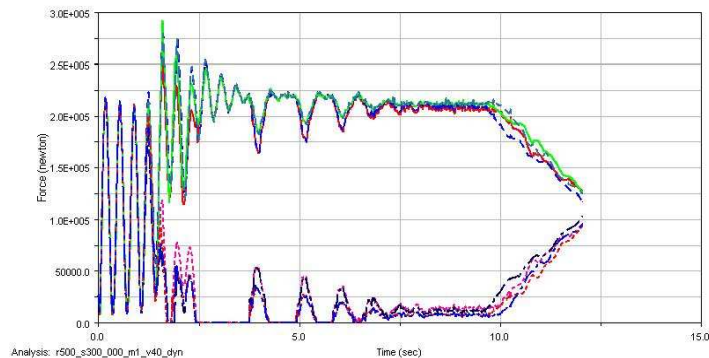


Figura 4.209: Fuerza vertical r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=40m/s

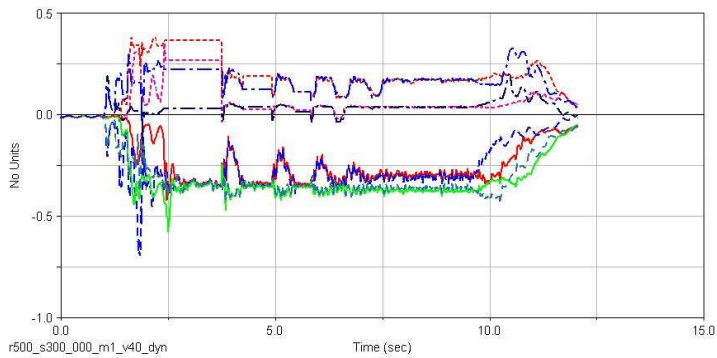


Figura 4.210: Coef. Desc r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=40m/s

En el análisis 66 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.70 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.57 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.209 se observa como la fuerza vertical de las ruedas interiores llega a 0 desde que entra en la curva en cuatro ocasiones por lo que en ese tiempo pierden el contacto con el carril.

Análisis 67

En la tabla 4.67 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 67 y en las figuras 4.211, 4.212 y 4.213 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.67: Características del análisis 67

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	100.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45

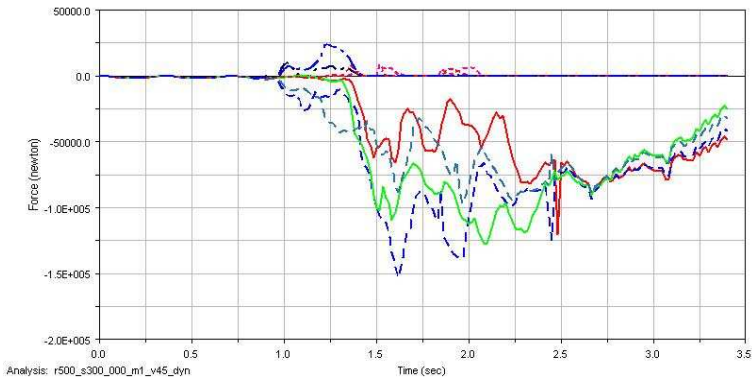


Figura 4.211: Fuerza lateral r=500m; k=100000N/m; m=40000kg; v=45m/s

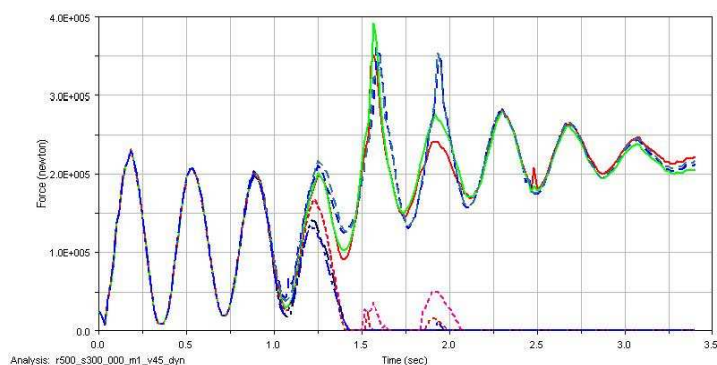


Figura 4.212: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

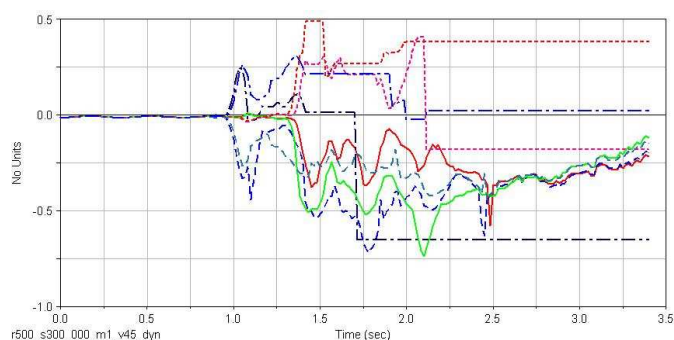


Figura 4.213: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=100000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

En el análisis 67 se produce un vuelco separándose primero todas las ruedas interiores del carril, luego las ruedas interna delantera del segundo bogie (3) e interna trasera del segundo bogie (7) vuelven a recuperar el contacto en dos ocasiones y finalmente se separan del carril como se aprecia en la figura 4.212.

#### Análisis 68

En la tabla 4.68 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 68 y en las figuras 4.214, 4.215 y 4.216 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.68: Características del análisis 68

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

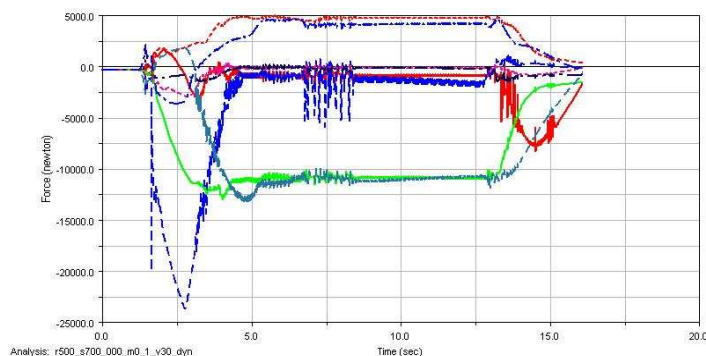


Figura 4.214: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

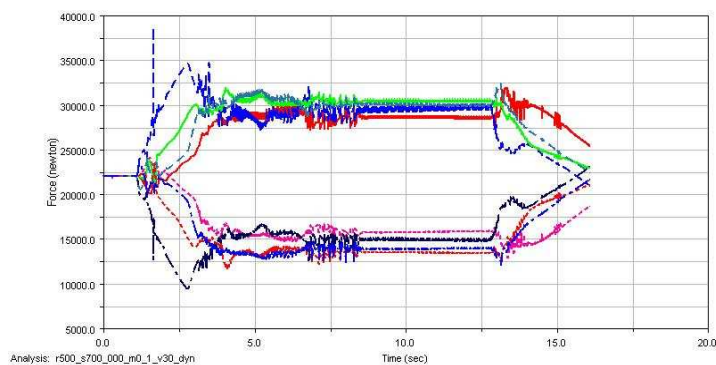


Figura 4.215: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

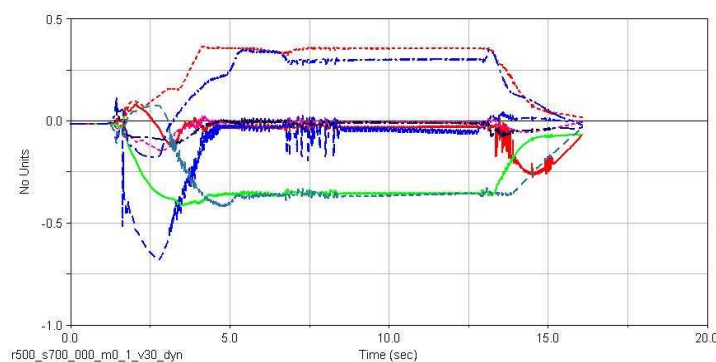


Figura 4.216: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

En el análisis 68 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.68 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.39 en la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 69

En la tabla 4.69 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 69 y en las figuras 4.217, 4.218 y 4.219 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.69: Características del análisis 69

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

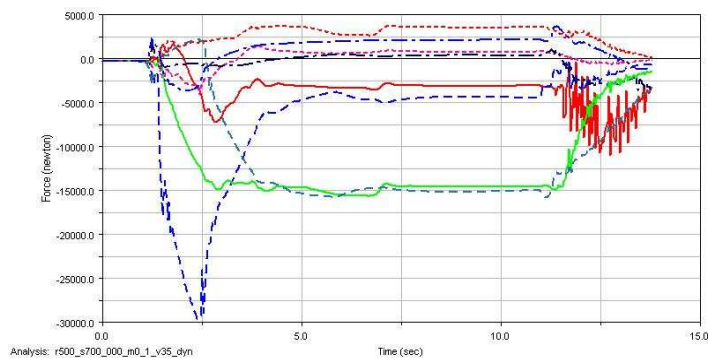
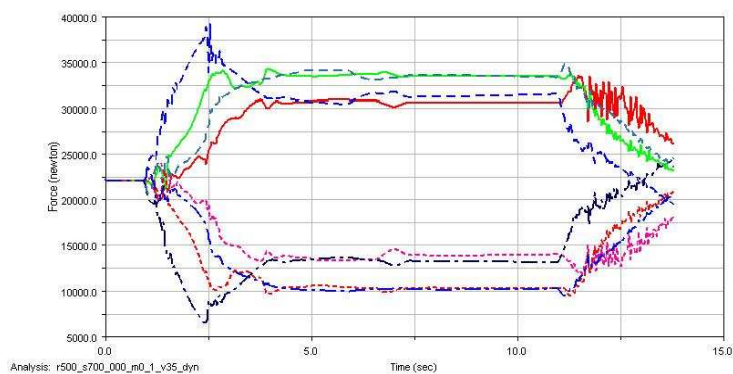
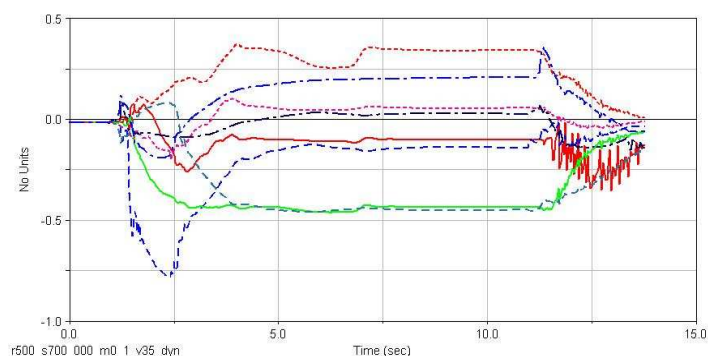


Figura 4.217: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$



Figura 4.218: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ Figura 4.219: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$ 

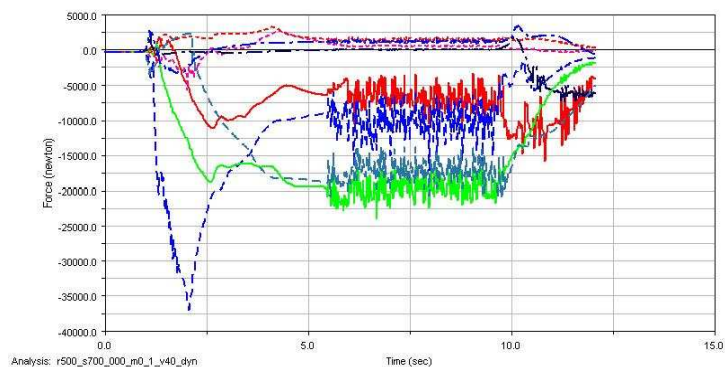
En el análisis 69 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.78 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.46 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

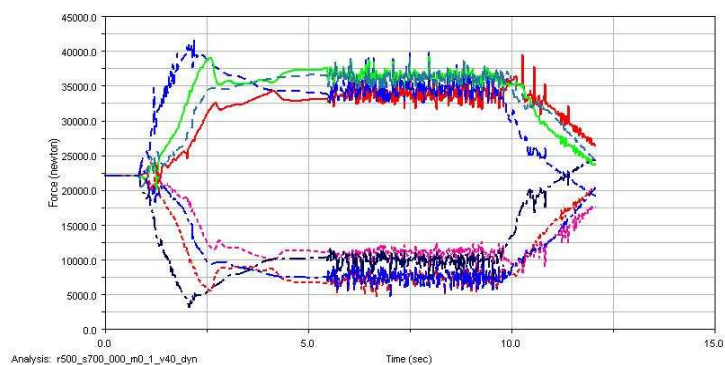
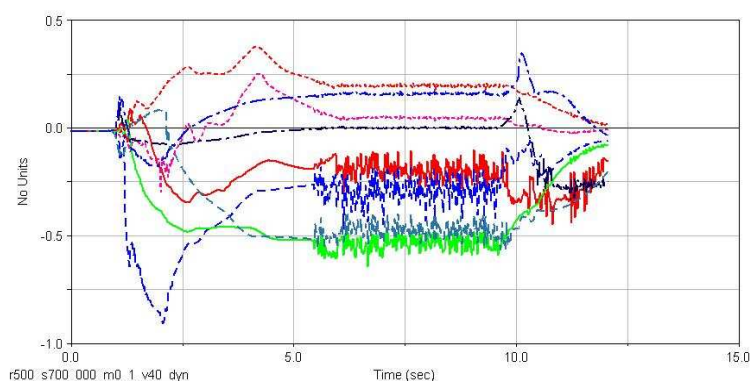
#### Análisis 70

En la tabla 4.70 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 70 y en las figuras 4.220, 4.221 y 4.222 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.70: Características del análisis 70

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

Figura 4.220: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

Figura 4.221: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$ Figura 4.222: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$ 

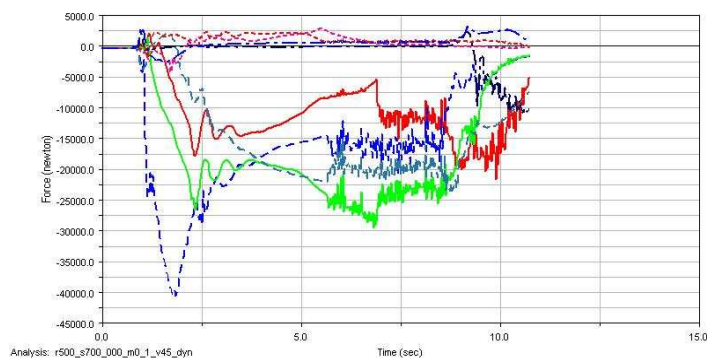
En el análisis 70 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.90 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.64 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 71

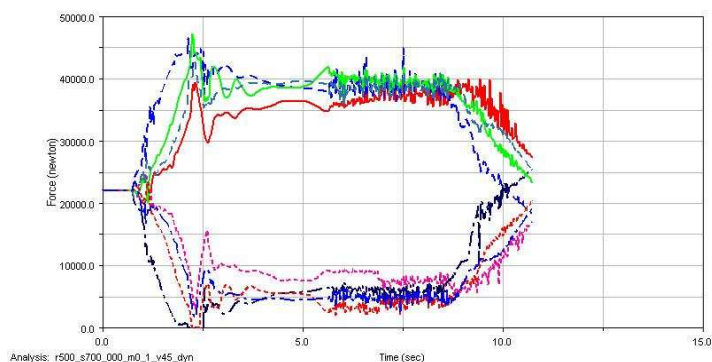
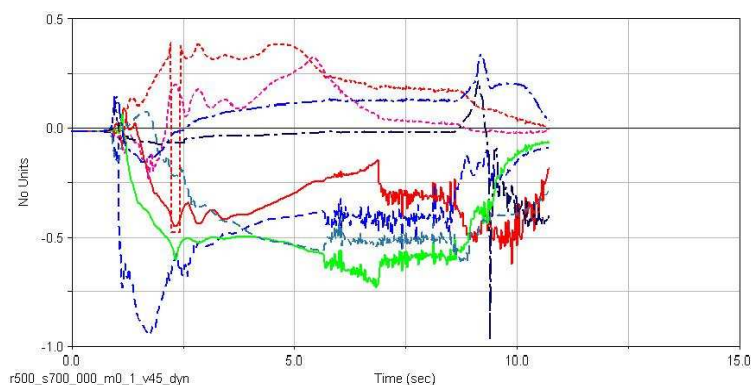
En la tabla 4.71 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 71 y en las figuras 4.223, 4.224 y 4.225 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.71: Características del análisis 71

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45

Figura 4.223: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$



Figura 4.224: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$ Figura 4.225: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$ 

En el análisis 71 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.95 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.73 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.224 se observa como la fuerza vertical de las ruedas interna delantera del primer bogie (4) e interna trasera del segundo bogie (7) llega a 0 solamente en la entrada en la curva por lo que en ese tiempo pierden el contacto con el carril.

### Análisis 72

En la tabla 4.72 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 72 y en las figuras 4.226, 4.227 y 4.228 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.72: Características del análisis 72

Características del análisis			
Radio de la curva (m)	500	K (N/m)	500.000
Masa (kg)	4000	Velocidad (m/s)	50

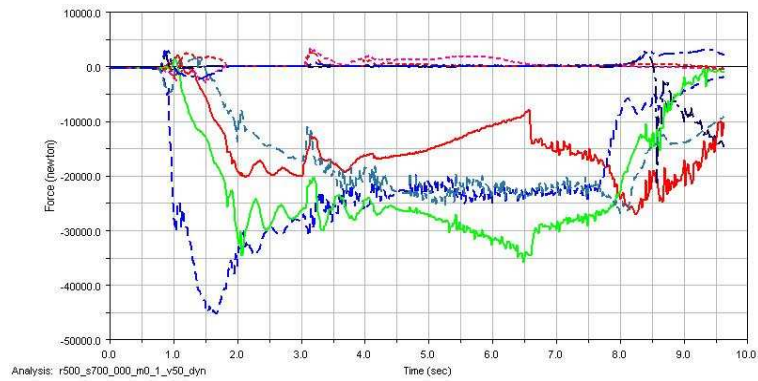


Figura 4.226: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

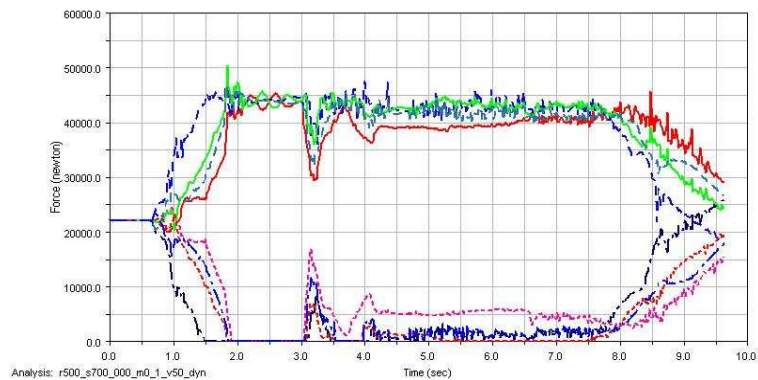


Figura 4.227: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

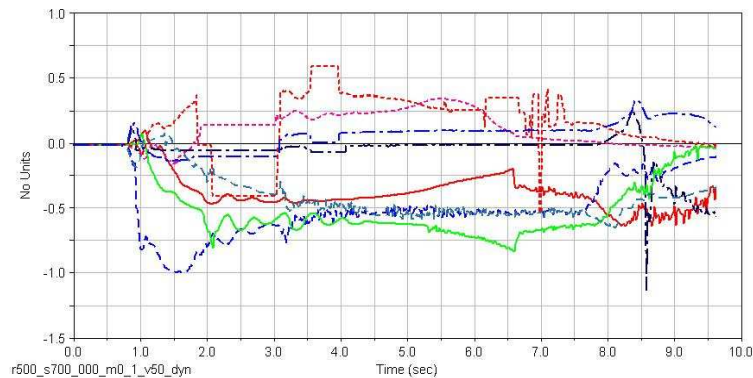


Figura 4.228: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$

En el análisis 72 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 1 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.84 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. Se puede apreciar en la figura 4.227 que el vagón realiza la trayectoria pero de forma muy inestable, al entrar en la curva las cuatro ruedas internas pierden el contacto con el carril, y durante el transcurso de la curva la rueda interna trasera del segundo bogie (7) en gran parte del recorrido no tiene contacto con el carril. Se observa en la figura 4.228 que la rueda interna delantera del primer bogie (4) obtiene un coeficiente de descarrilamiento de 1.13 al estabilizarse el vagón en la recta final.

### Análisis 73

En la tabla 4.73 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 73 y en las figuras 4.229, 4.230 y 4.231 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.73: Características del análisis 73

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

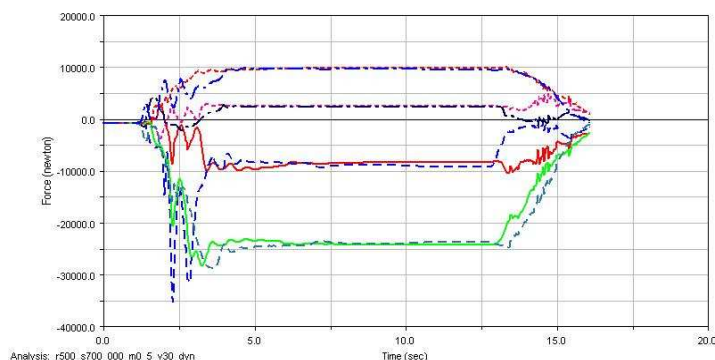


Figura 4.229: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

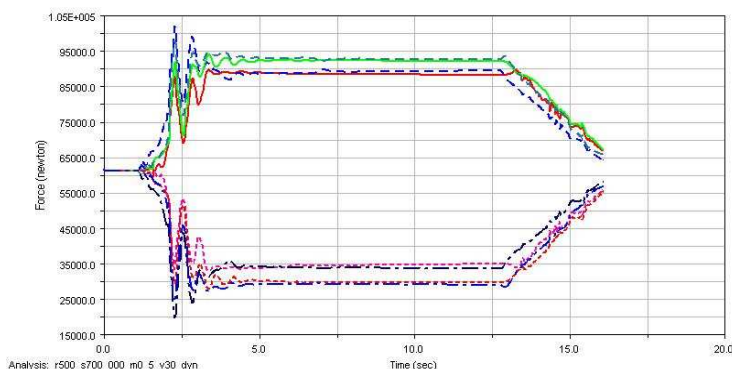


Figura 4.230: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

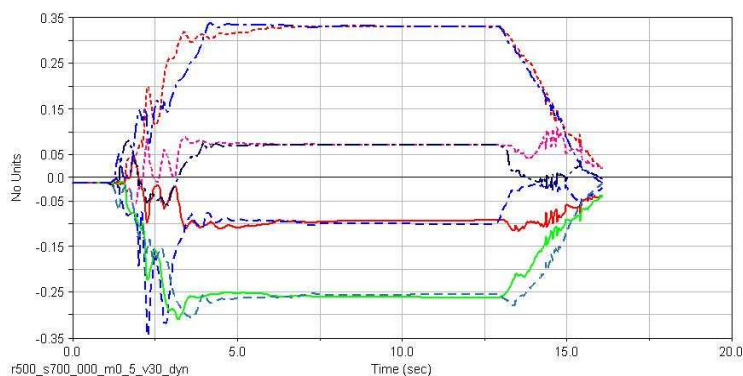


Figura 4.231: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

En el análisis 73 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.34 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.33 en la rueda interna trasera del primer bogie (8) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 74

En la tabla 4.74 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 74 y en las figuras 4.232, 4.233 y 4.234 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.74: Características del análisis 74

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

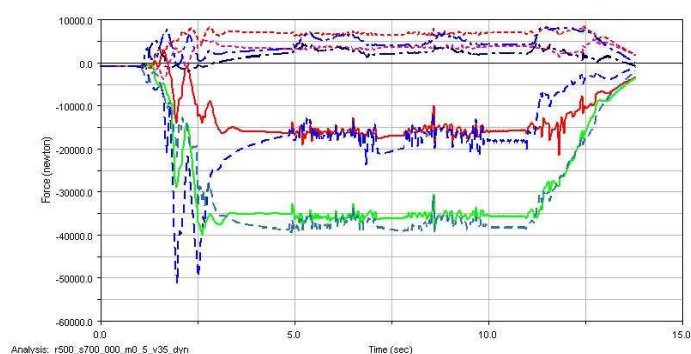


Figura 4.232: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

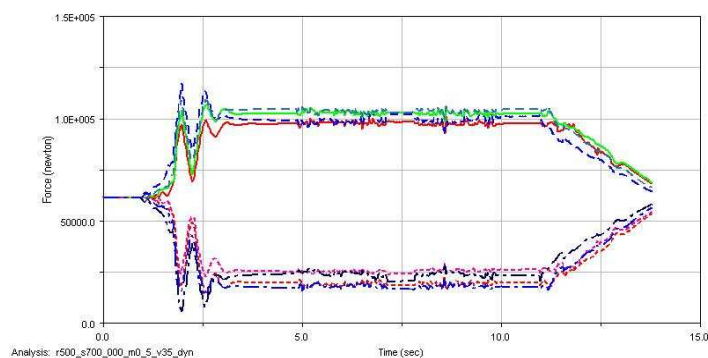


Figura 4.233: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

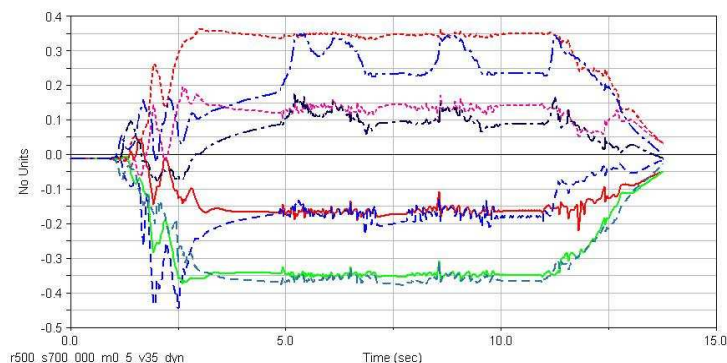


Figura 4.234: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 74 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.45 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.38 en la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 75

En la tabla 4.75 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 75 y en las figuras 4.235, 4.236 y 4.237 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.75: Características del análisis 75

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

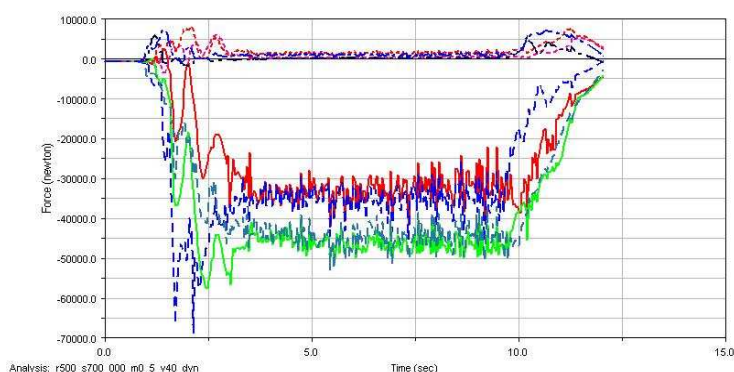


Figura 4.235: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

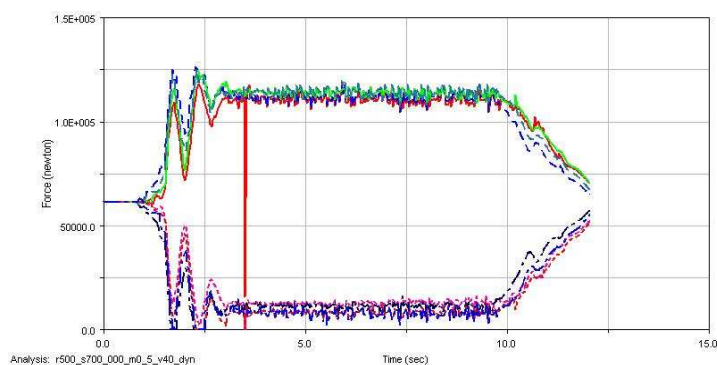


Figura 4.236: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

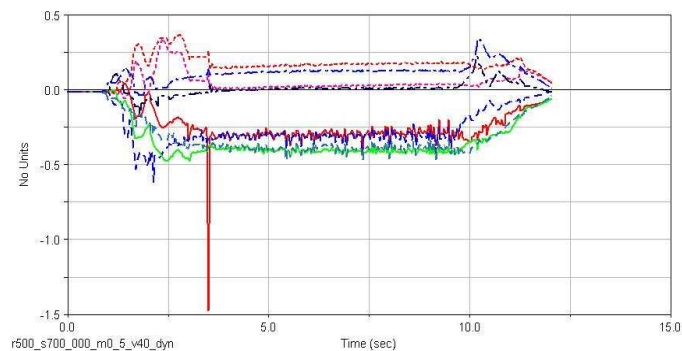


Figura 4.237: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 75 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.62 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 1.48 en la rueda externa delantera del segundo bogie (1) en el transcurso de la curva, este valor tan alto se produce en un espacio de tiempo muy pequeño y debido a una puntual gran disminución del valor de la fuerza vertical de dicha rueda como se puede observar en la figura 4.234. En esta figura también se observa que las ruedas interna delantera del primer bogie (4) e interna trasera del primer bogie (8) dejan de tener contacto con el carril en dos ocasiones a la entrada de la curva.

#### Análisis 76

En la tabla 4.76 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 76 y en las figuras 4.238, 4.239 y 4.240 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.76: Características del análisis 76

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45

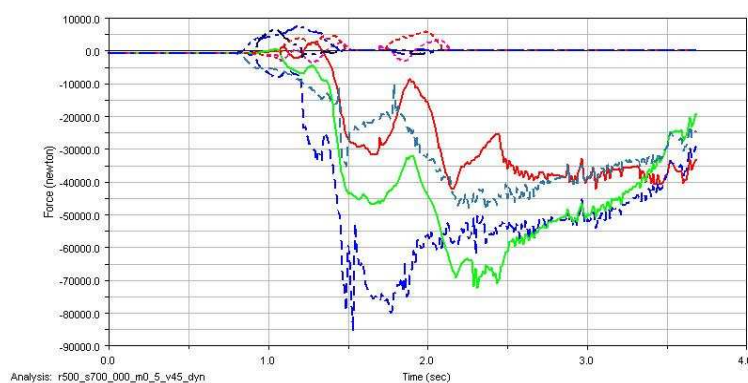


Figura 4.238: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=200000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

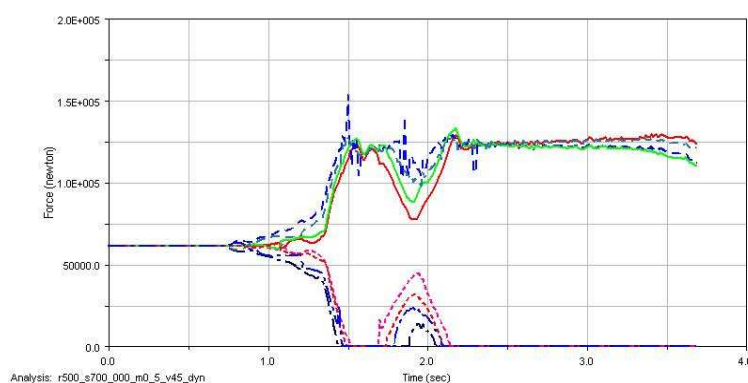
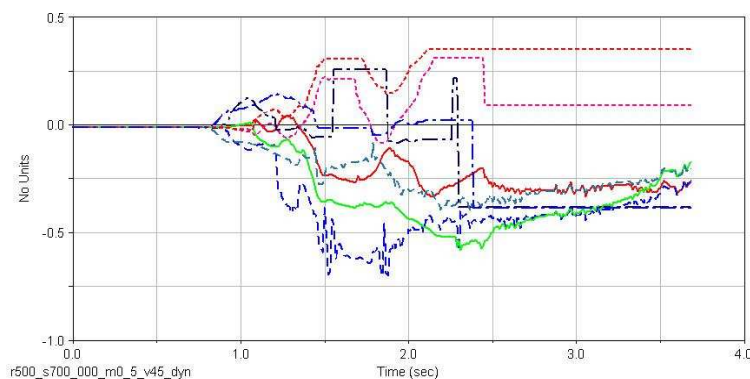


Figura 4.239: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=200000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$



Figura 4.240: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=200000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$ 

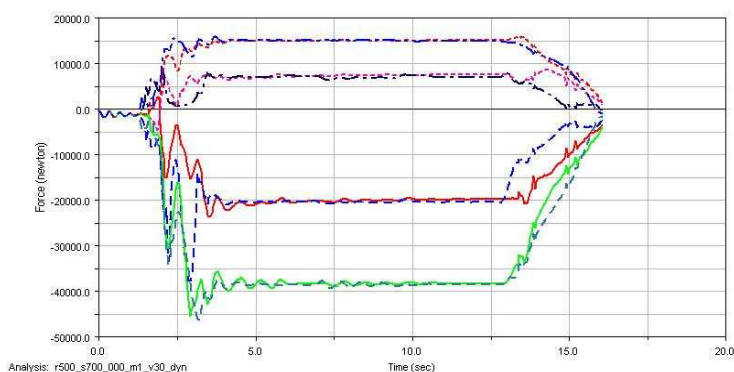
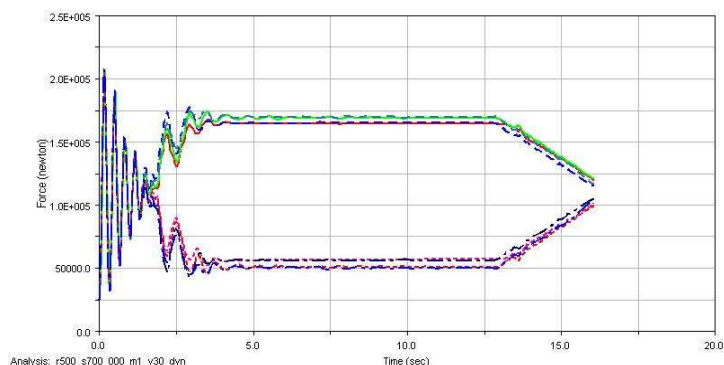
Las ruedas internas dejan de tener contacto entrando en la curva, tras recuperarlo, lo vuelven a perder permanentemente en el mismo orden que en el análisis 5 produciéndose el vuelco del vagón.

### Análisis 77

En la tabla 4.77 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 77 y en las figuras 4.241, 4.242 y 4.243 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.77: Características del análisis 77

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

Figura 4.241: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.242: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

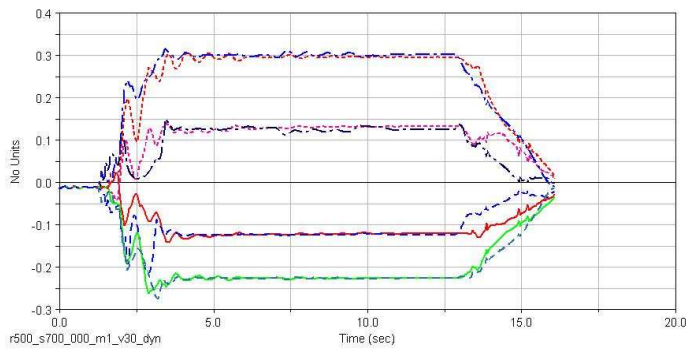


Figura 4.243: Coef. Desc r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=30m/s

En el análisis 77 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.32 para la rueda interna trasera del primer bogie (8) entrando en la curva y un valor máximo de 0.31 en la rueda interna trasera del primer bogie (8) en el transcurso de la curva.

Análisis 78

En la tabla 4.78 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 78 y en las figuras 4.244, 4.245 y 4.246 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.78: Características del análisis 78

Radio de la curva (m)	500	K (N/m)	500.000
Masa (kg)	40000	Velocidad (m/s)	35

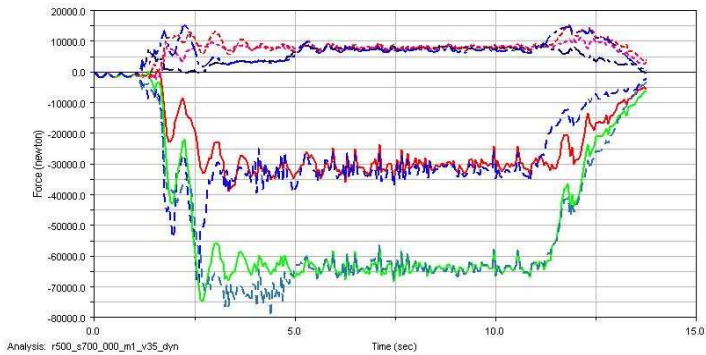


Figura 4.244: Fuerza lateral r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=35m/s

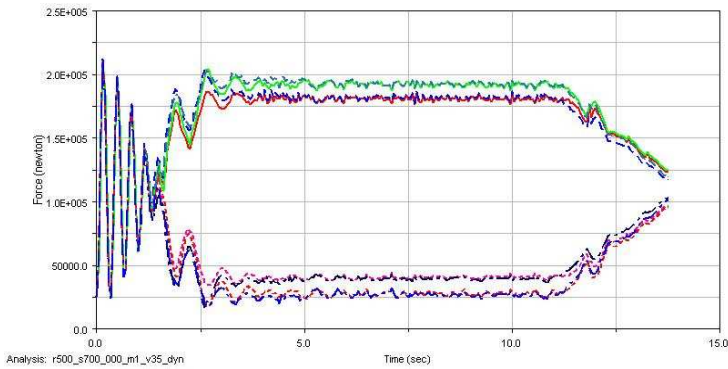


Figura 4.245: Fuerza vertical r=500m; k=500000N/m; m=40000kg; v=35m/s



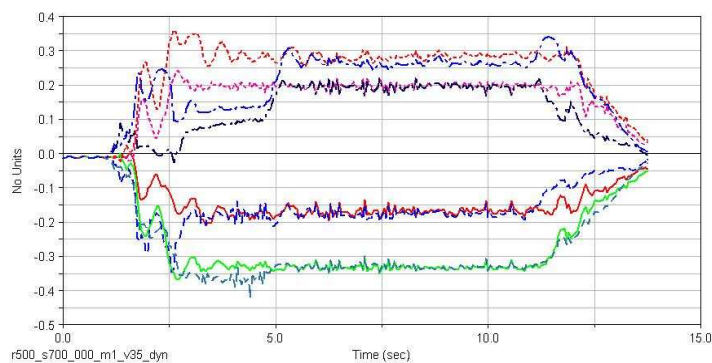


Figura 4.246: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 78 se obtiene un valor máximo de 0.42 en la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 79

En la tabla 4.79 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 79 y en las figuras 4.247, 4.248 y 4.249 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.79: Características del análisis 79

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

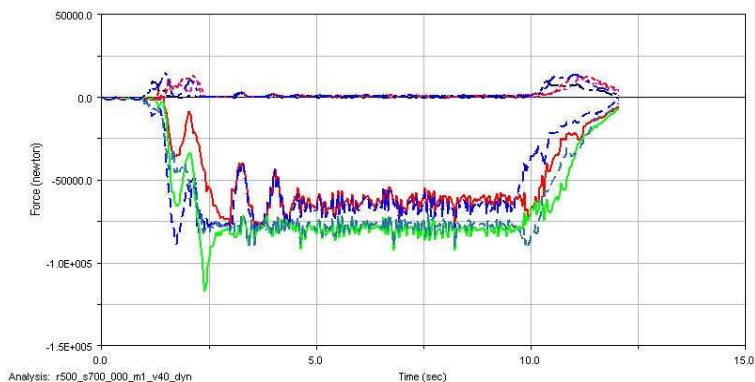


Figura 4.247: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

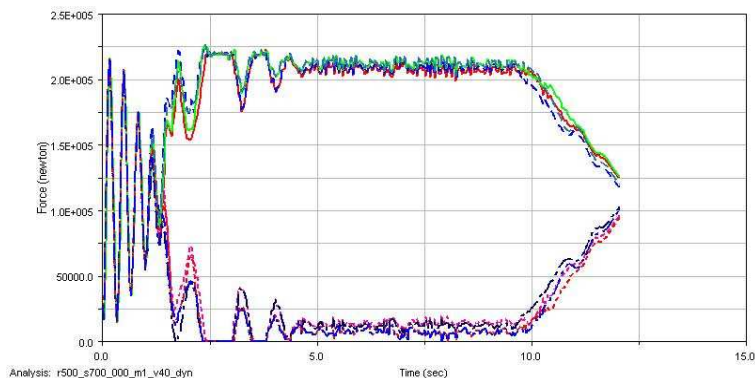


Figura 4.248: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

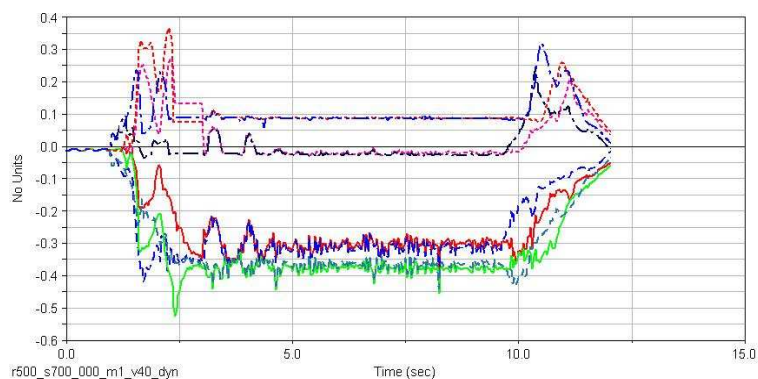


Figura 4.249: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 79 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.53 para la rueda externa trasera del segundo bogie (5) entrando en la curva y un valor máximo de 0.45 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.248 se observa como la fuerza vertical de las ruedas interiores llega a 0 desde que entra en la curva en tres ocasiones por lo que en ese tiempo pierden el contacto con el carril.

#### Análisis 80

En la tabla 4.80 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 80 y en las figuras 4.250, 4.251 y 4.252 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.80: Características del análisis 80

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	500.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45

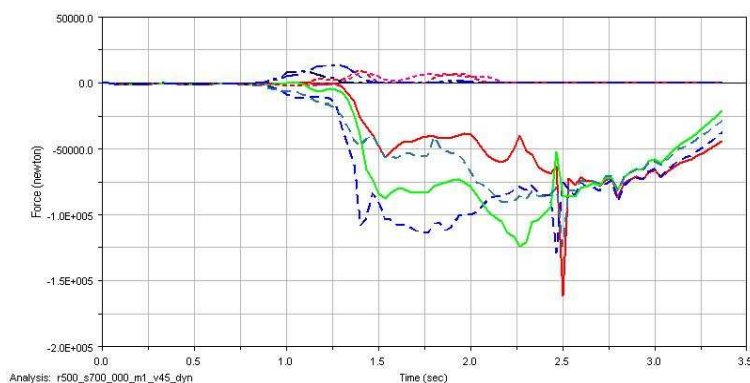
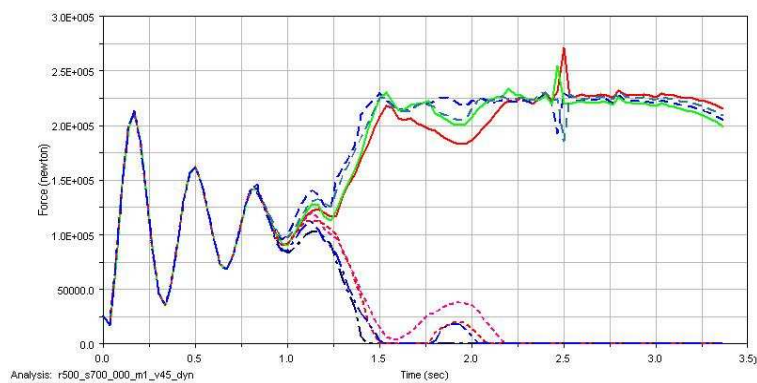
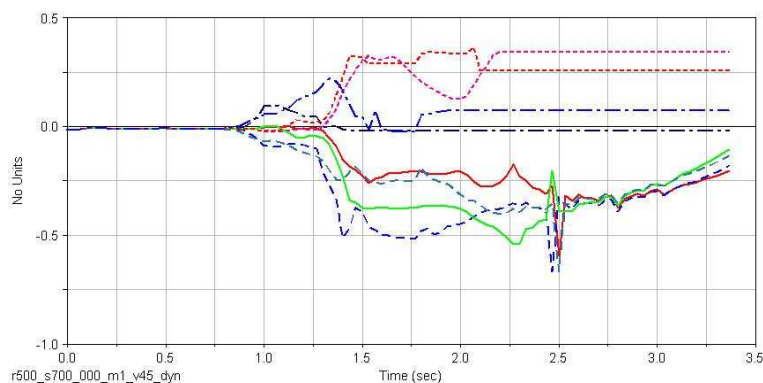


Figura 4.250: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

Figura 4.251: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$ Figura 4.252: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=500000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$ 

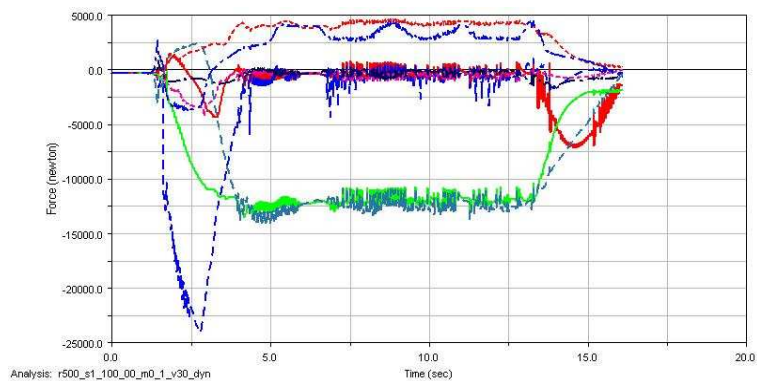
En el análisis 80 se produce un vuelco en el mismo orden que en el análisis 5.

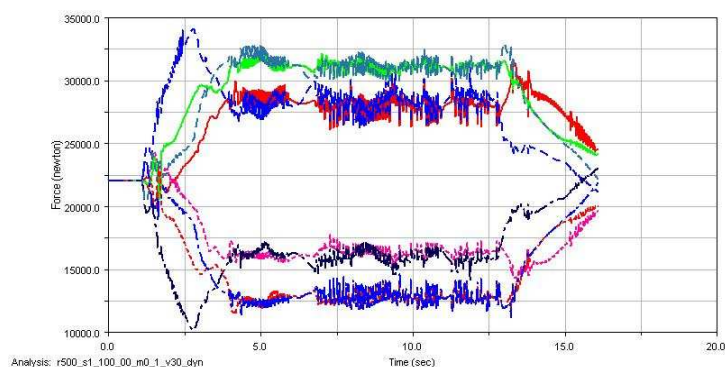
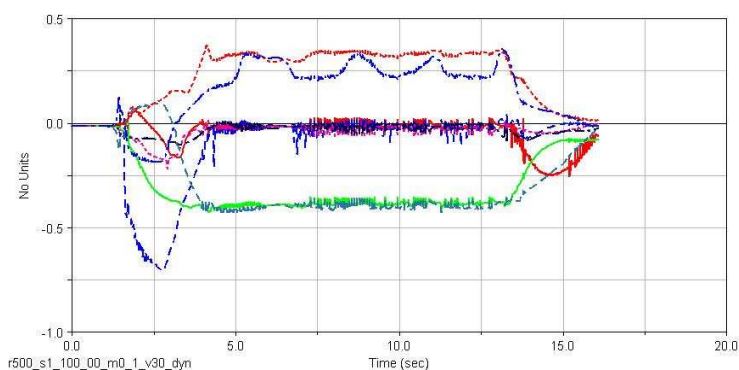
### Análisis 81

En la tabla 4.81 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 81 y en las figuras 4.253, 4.254 y 4.255 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.81: Características del análisis 81

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

Figura 4.253: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

Figura 4.254: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.255: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ 

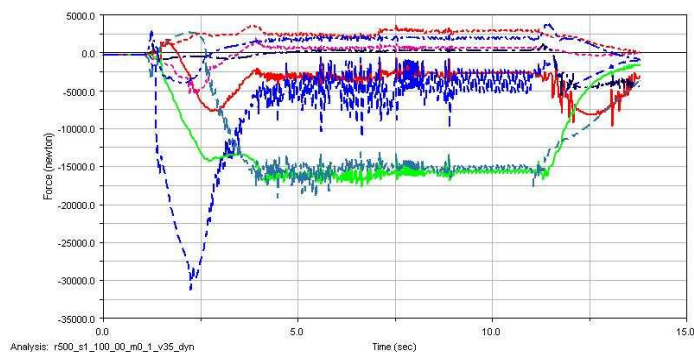
En el análisis 81 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.71 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.43 en la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva.

### Análisis 82

En la tabla 4.82 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 82 y en las figuras 4.256, 4.257 y 4.258 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.82: Características del análisis 82

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

Figura 4.256: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

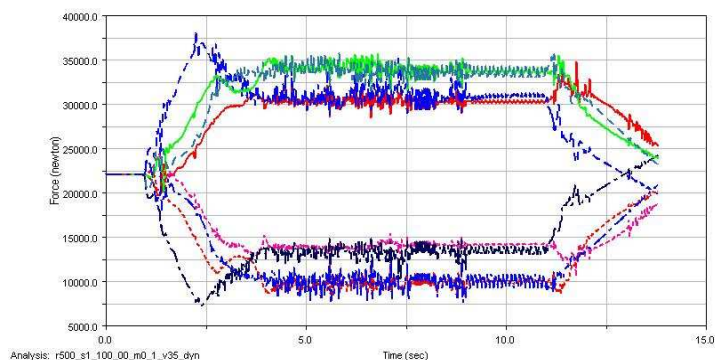


Figura 4.257: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

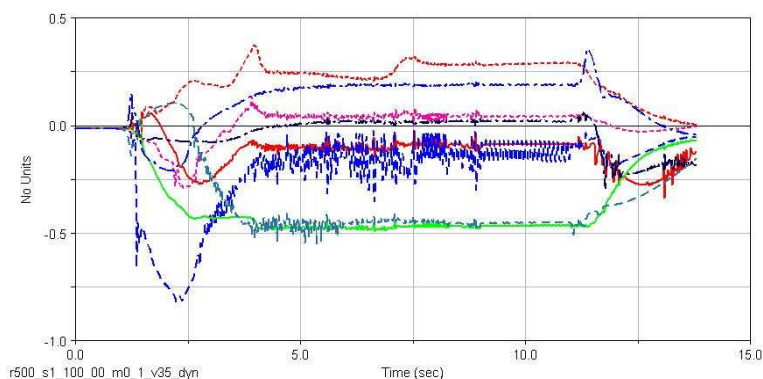


Figura 4.258: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 82 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.82 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.55 en la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva.

### Análisis 83

En la tabla 4.83 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 83 y en las figuras 4.259, 4.260 y 4.261 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.83: Características del análisis 83

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

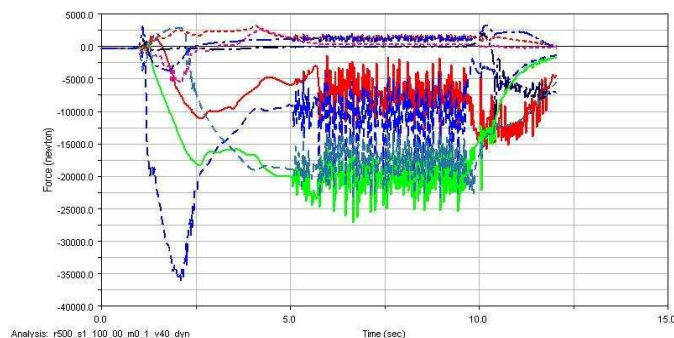
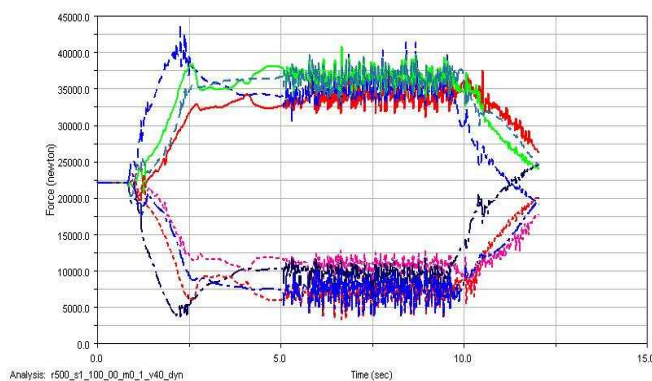
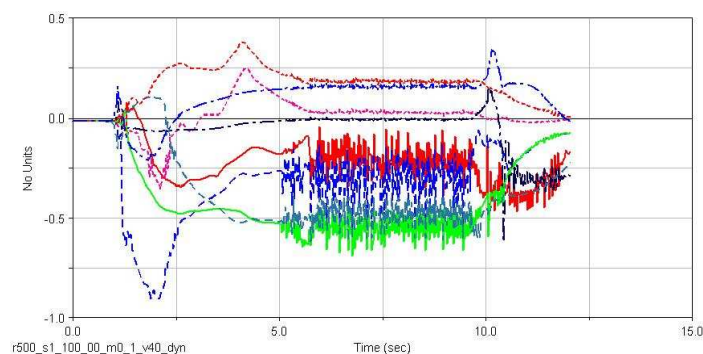


Figura 4.259: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

Figura 4.260: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$ Figura 4.261: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$ 

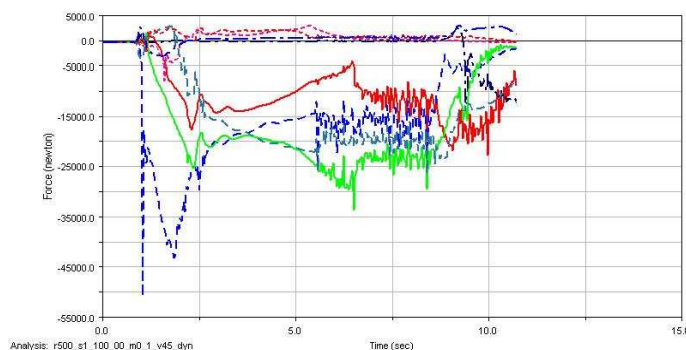
En el análisis 83 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.9 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.69 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 84

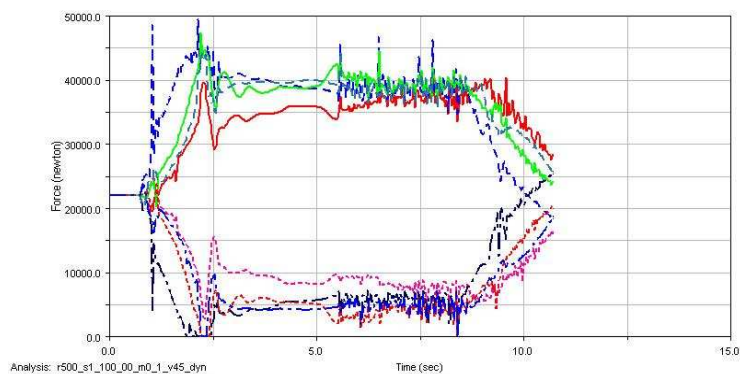
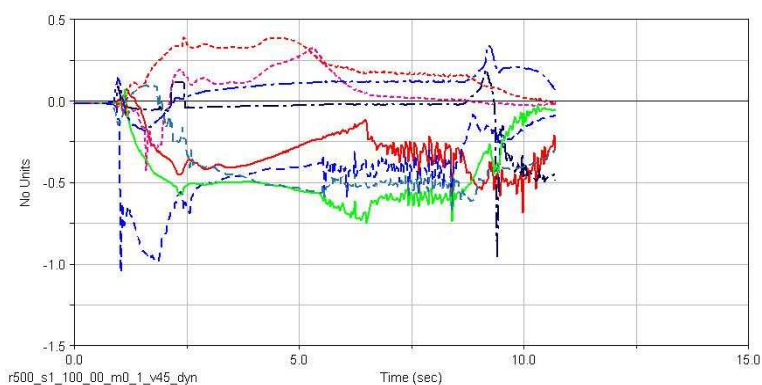
En la tabla 4.84 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 84 y en las figuras 4.262, 4.263 y 4.264 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.84: Características del análisis 84

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45

Figura 4.262: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$



Figura 4.263: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$ Figura 4.264: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$ 

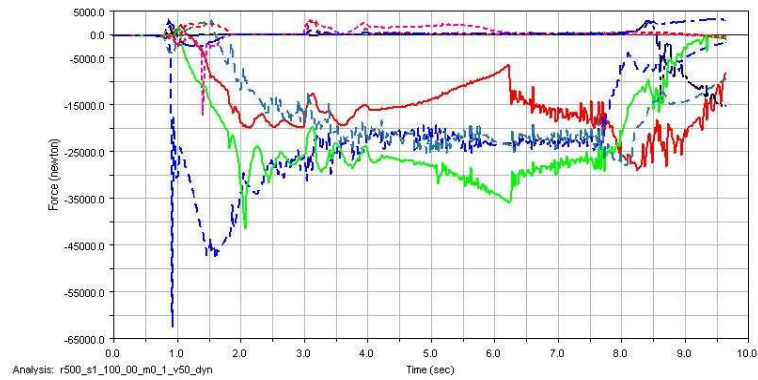
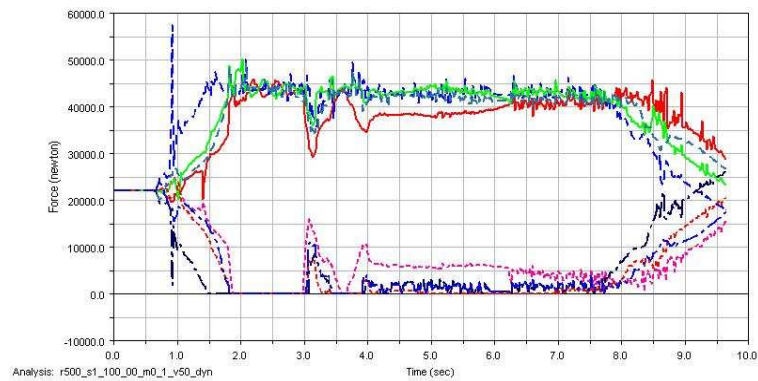
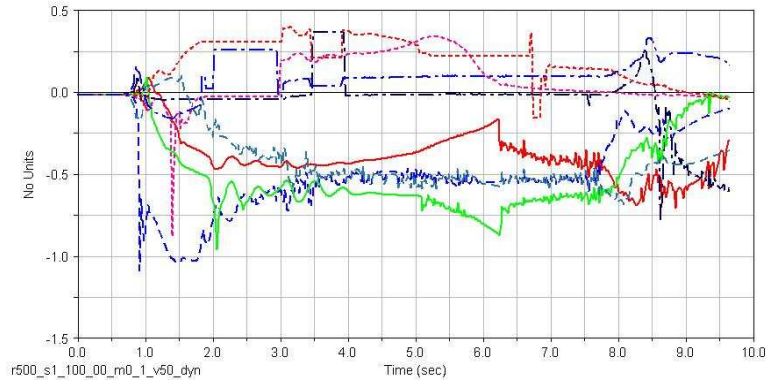
En el análisis 84 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 1.05 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.75 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.262 se observa como la fuerza vertical de las ruedas interna delantera del primer bogie (4), interna trasera del segundo bogie (7) e interna trasera del primer bogie (8) llega a 0 solamente en la entrada en la curva por lo que en ese tiempo pierden el contacto con el carril.

#### Análisis 85

En la tabla 4.85 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 85 y en las figuras 4.265, 4.266 y 4.267 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.85: Características del análisis 85

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	4000	<b>Velocidad (m/s)</b>	50

Figura 4.265: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$ Figura 4.266: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$ Figura 4.267: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=4000\text{kg}$ ;  $v=50\text{m/s}$ 

En el análisis 85 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 1.08 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.87 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. Se puede apreciar en la figura 4.265 que el vagón realiza la trayectoria pero de forma muy inestable, al entrar en la curva las cuatro ruedas internas pierden el contacto con el carril, y durante el transcurso de la curva las ruedas interna trasera del primer bogie (8) e interna delantera del primer bogie (4) en gran parte del recorrido no tienen contacto con el carril.



### Análisis 86

En la tabla 4.86 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 86 y en las figuras 4.268, 4.269 y 4.270 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.86: Características del análisis 86

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

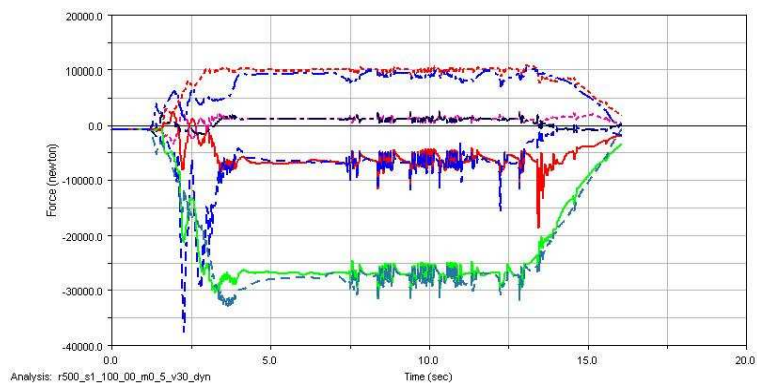


Figura 4.268: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

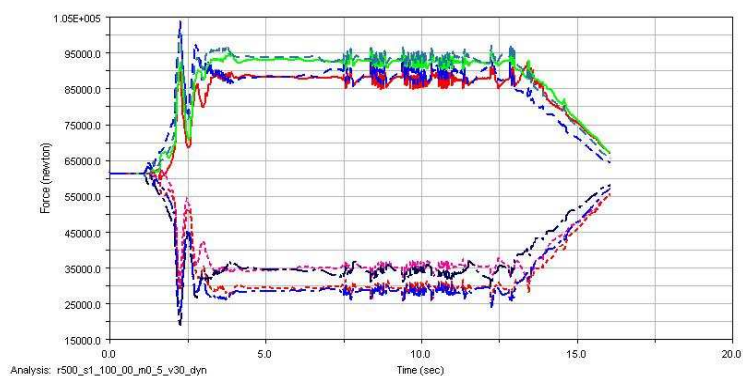


Figura 4.269: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

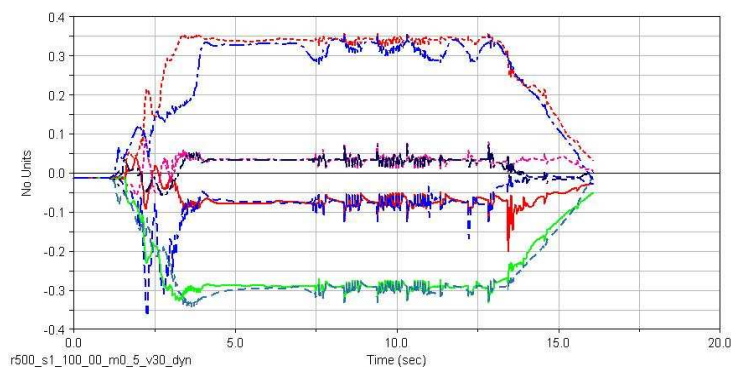


Figura 4.270: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

En el análisis 86 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.37 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.36 en la rueda interna trasera del segundo bogie (7) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 87

En la tabla 4.87 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 87 y en las figuras 4.271, 4.272 y 4.273 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.87: Características del análisis 87

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

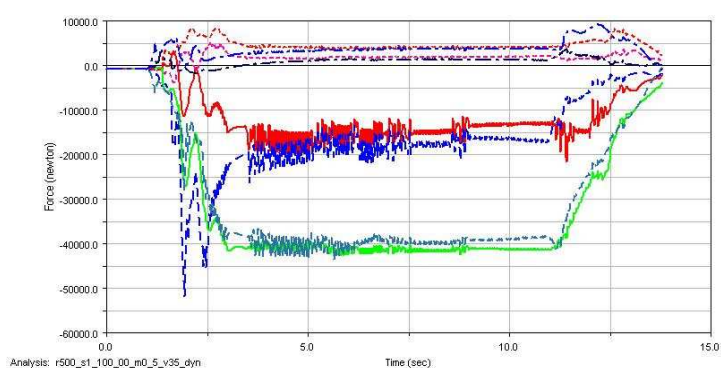


Figura 4.271: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

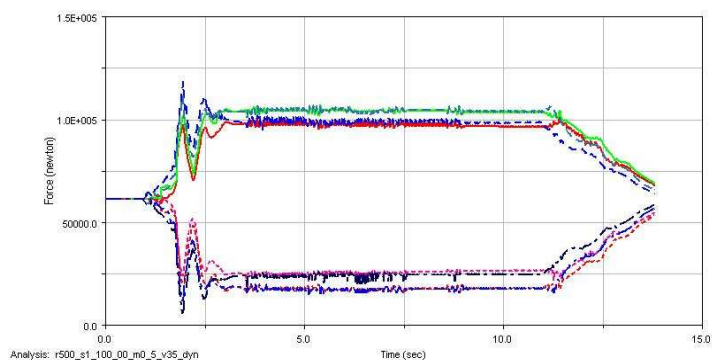


Figura 4.272: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

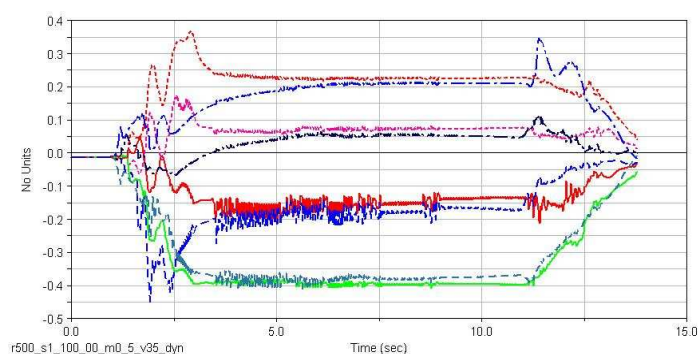


Figura 4.273: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 87 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.45 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.41 en la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 88

En la tabla 4.88 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 88 y en las figuras 4.274, 4.275 y 4.276 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.88: Características del análisis 88

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

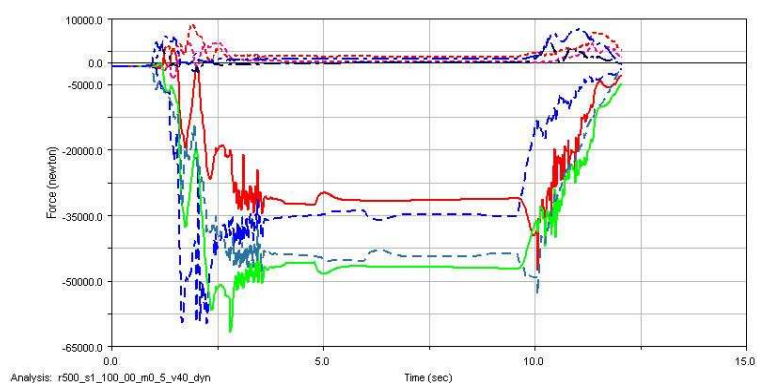


Figura 4.274: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

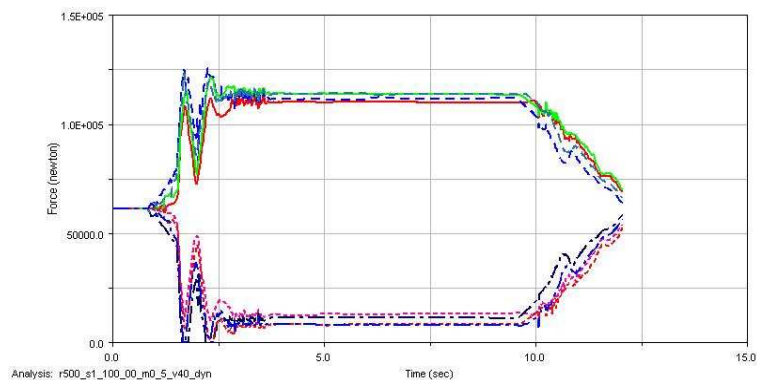


Figura 4.275: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

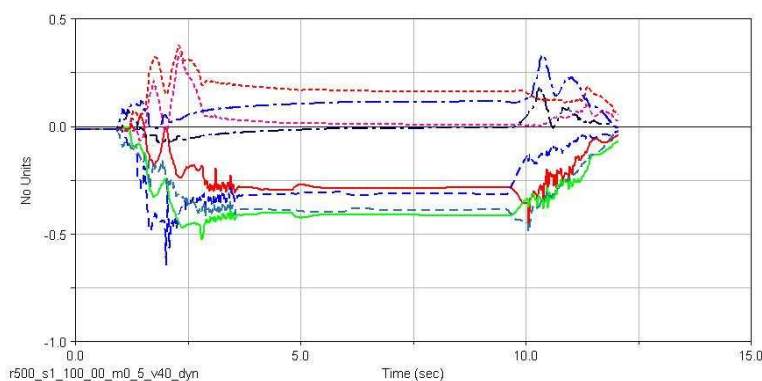


Figura 4.276: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 88 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.65 para la rueda externa delantera del primer bogie (2) entrando en la curva y un valor máximo de 0.43 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. En la figura 4.274 se puede observar como las ruedas interna delantera del primer bogie (4) e interna trasera del primer bogie (8) pierden el contacto con el carril al entrar en la curva, tras recuperarlo, lo vuelve a perder las ruedas interna delantera del primer bogie (4) e interna trasera del segundo bogie (7) y finalmente se acoplan al carril.

#### Análisis 89

En la tabla 4.89 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 89 y en las figuras 4.277, 4.278 y 4.279 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.89: Características del análisis 89

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	20000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45

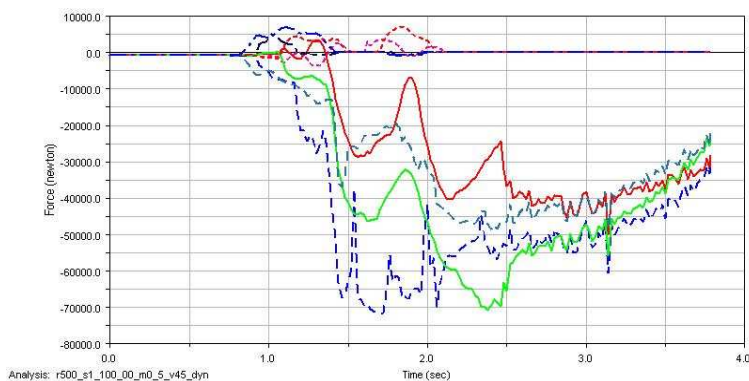


Figura 4.277: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

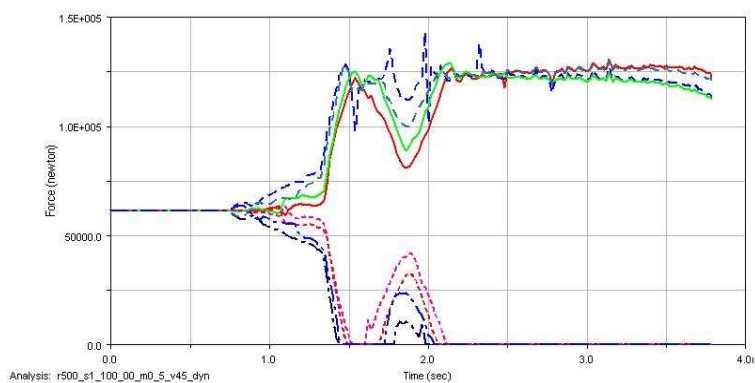


Figura 4.278: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

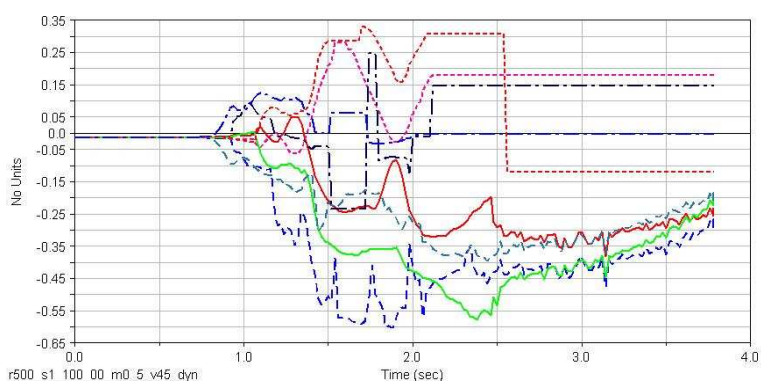


Figura 4.279: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=20000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

Las ruedas internas dejan de tener contacto entrando en la curva, tras recuperarlo, lo vuelven a perder permanentemente en el mismo orden que en el análisis 5 produciéndose el vuelco del vagón.

#### Análisis 90

En la tabla 4.90 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 90 y en las figuras 4.280, 4.281 y 4.282 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.90: Características del análisis 90

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	30

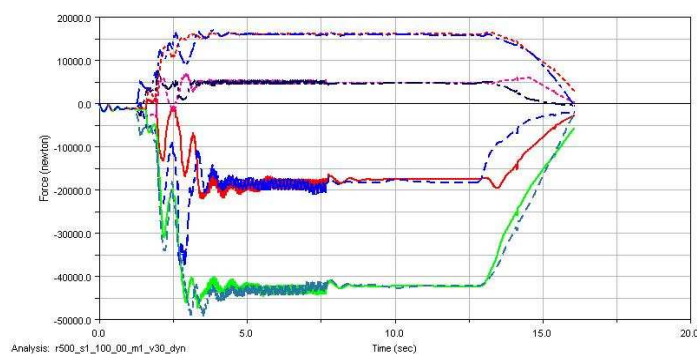
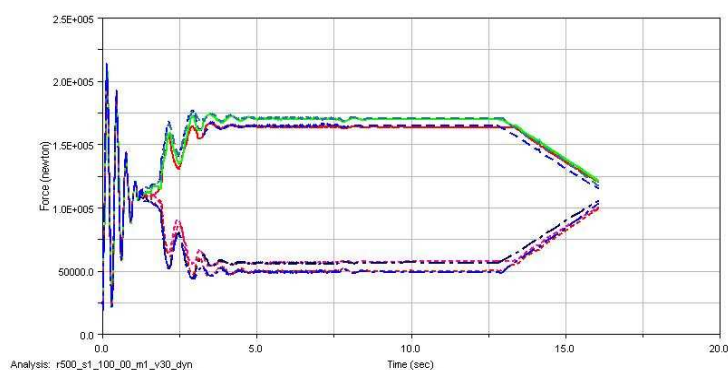
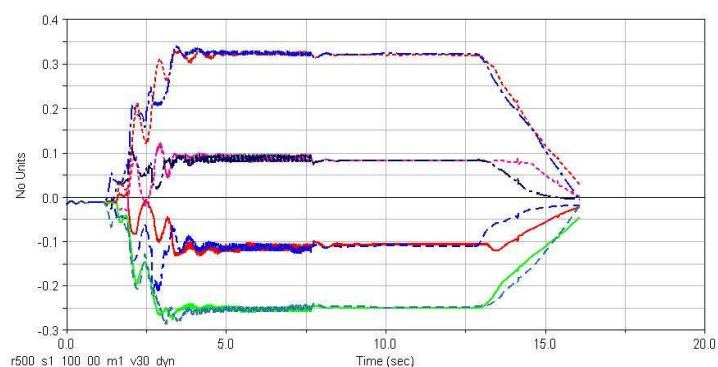


Figura 4.280: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$

Figura 4.281: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ Figura 4.282: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=30\text{m/s}$ 

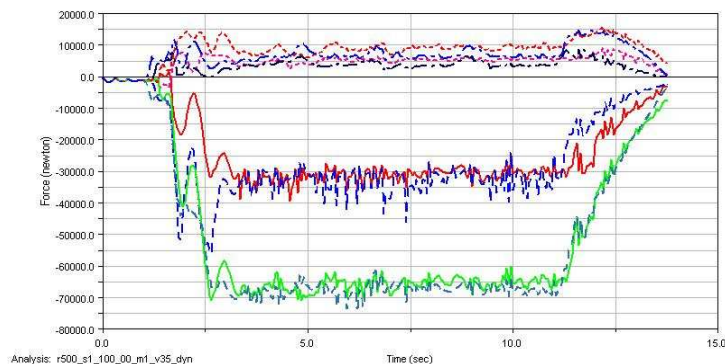
En el análisis 90 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.34 para la rueda interna trasera del primer bogie (8) entrando en la curva y un valor máximo de 0.33 en la rueda interna trasera del primer bogie (8) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 91

En la tabla 4.91 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 91 y en las figuras 4.283, 4.284 y 4.285 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.91: Características del análisis 91

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	35

Figura 4.283: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$



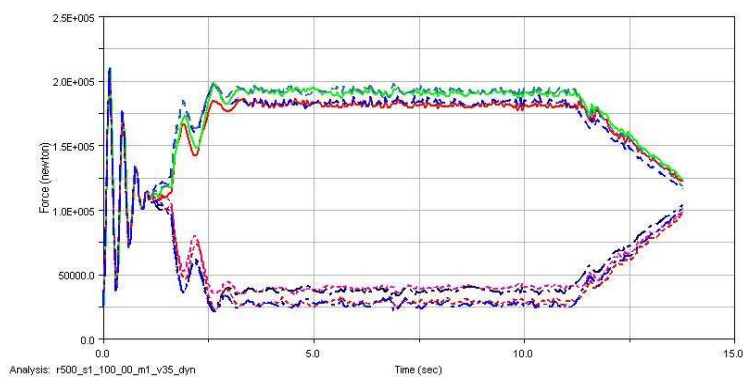


Figura 4.284: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

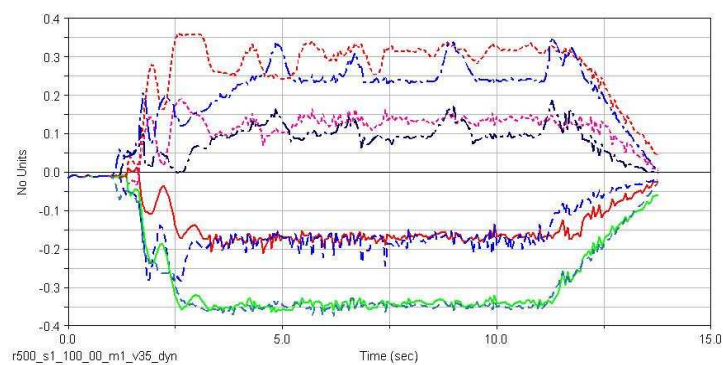


Figura 4.285: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=35\text{m/s}$

En el análisis 91 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.34 para la rueda externa trasera del primer bogie (6) en el transcurso de la curva.

#### Análisis 92

En la tabla 4.92 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 92 y en las figuras 4.286, 4.287 y 4.288 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.92: Características del análisis 92

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	40

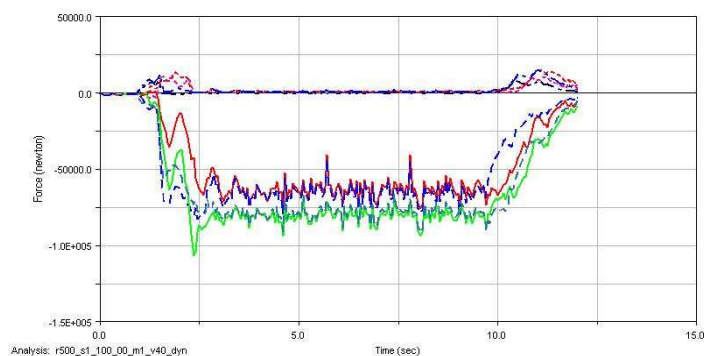


Figura 4.286: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

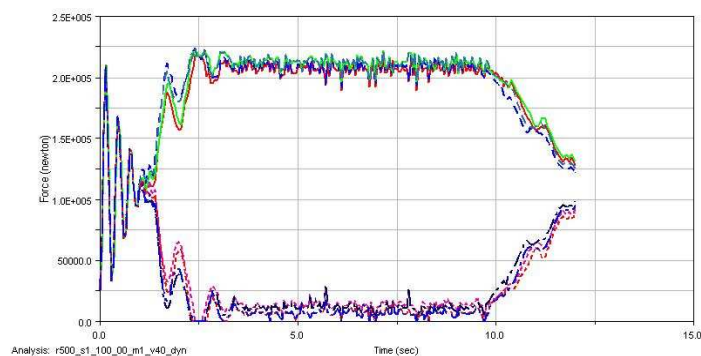


Figura 4.287: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

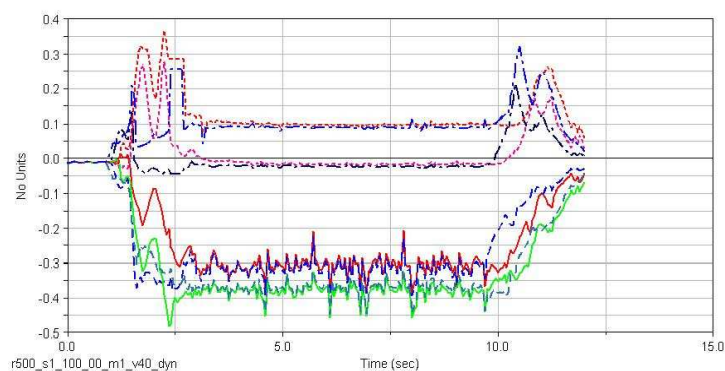


Figura 4.288: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=40\text{m/s}$

En el análisis 92 se obtiene un valor máximo de coeficiente de descarrilamiento de 0.48 para la rueda externa trasera del segundo bogie (5) entrando en la curva y un valor máximo de 0.46 en la rueda externa trasera del segundo bogie (5) en el transcurso de la curva. Como se puede observar en la figura 4.286, las ruedas internas pierden el contacto con el carril al entrar en la curva durante 0.4 s.

#### Análisis 93

En la tabla 4.93 se muestra el valor de los parámetros correspondientes al análisis 93 y en las figuras 4.289, 4.290 y 4.291 se muestran las gráficas de “fuerza lateral vs tiempo”, “fuerza vertical vs tiempo” y “coef. de desc. vs tiempo” respectivamente de dicho análisis.

Tabla 4.93: Características del análisis 93

<b>Radio de la curva (m)</b>	500	<b>K (N/m)</b>	900.000
<b>Masa (kg)</b>	40000	<b>Velocidad (m/s)</b>	45



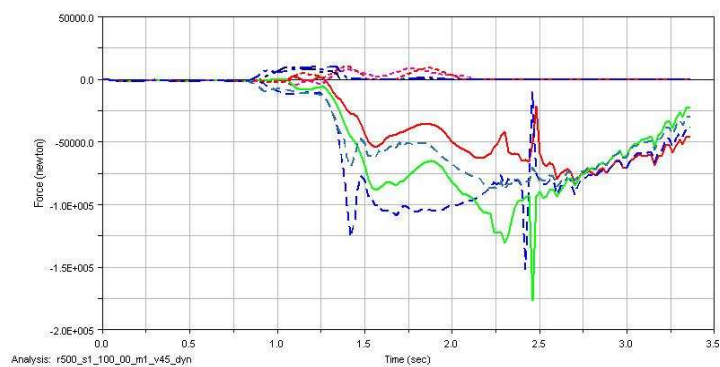


Figura 4.289: Fuerza lateral  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

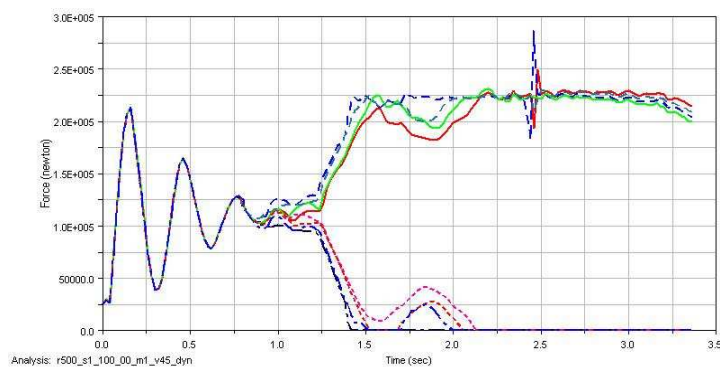


Figura 4.290: Fuerza vertical  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

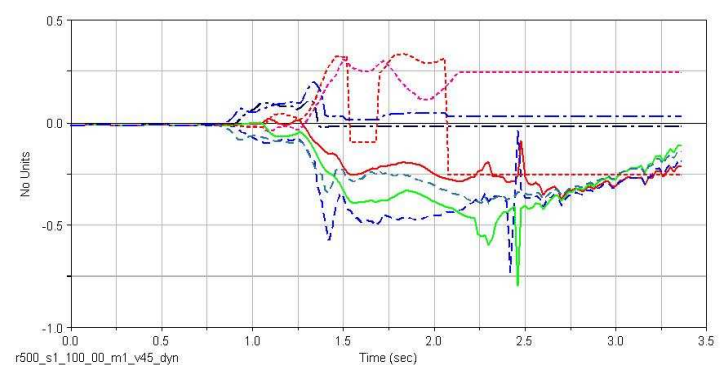


Figura 4.291: Coef. Desc  $r=500\text{m}$ ;  $k=900000\text{N/m}$ ;  $m=40000\text{kg}$ ;  $v=45\text{m/s}$

En el análisis 93 se produce un vuelco del vagón en el mismo orden que en el análisis 5.

## 5. Conclusiones y futuros trabajos

---

### 5.1. Conclusiones

Los valores del coeficiente de descarrilamiento que han sido resultado en los análisis de este estudio son siempre elevados debido a los altos valores de los parámetros que se han tratado en el estudio, no obstante, son situaciones que se pueden dar en algunos casos. En este proyecto se han estudiado los parámetros más relevantes y el grado de influencia de éstos para que se produzca el descarrilamiento. Es de destacar que la geometría de la pestaña de la rueda es una variable de gran causalidad en el desarrollo del contacto rueda-carril, y por tanto, en el comportamiento del vagón frente al descarrilamiento, pero no se ha incluido en los análisis el tipo de perfil porque el bogie Y25 solo tiene un tipo, el perfil "P8".

Para un mejor entendimiento y resolución de conclusiones se facilitan dos tablas en las que se recopilan los máximos coeficiente de descarrilamiento para cada análisis. La tabla 4.94 muestra todos los valores máximos entrando en la curva y la tabla 4.95 durante su tránsito por ella.

El recuadro en azul significa que en esa situación el vagón descarrila, las casillas en rojo significa que el vagón vuelca y las casillas con un símbolo "<" significa que el valor máximo de coeficiente de descarrilamiento al entrar en la curva es menor que el que se produce en el transcurso de la curva.

Posteriormente se presenta un estudio de sensibilidad donde se muestran dos tablas en las que figuran los porcentajes de variación del coeficiente de descarrilamiento respecto a los porcentajes de variación de los parámetros.

Tabla 4.94: Valores máximos de coeficiente de descarrilamiento al entrar en la curva

RADIO (m)			300			400			500		
SUSPENSION (N/m)	MASA (kg)	VELOCIDAD (m/s)	nº	Coef. Desc.	Rueda	nº	Coef. Desc.	Rueda	nº	Coef. Desc.	Rueda
100000	4000	30	1	1,028	2	22	0,7	2	55	0,65	2
		35	2	1,067	3	23	0,87	2	56	0,87	2
		40	3	1,03	2	24	0,93	2	57	0,82	2
		45				25	1,26	2	58	1,24	2
		50				26	1,25	2	59	0,98	2
	20000	30	4	0,68	2	27	0,5	2	60	<	
		35	5			28	0,62	2	61	0,5	2
		40				29			62	0,98	2
		45							63		
		50									
	40000	30	6	0,49	2	30	0,38	5	64	0,36	7
		35	7			31	0,52	5	65	0,45	2
		40				32			66	0,7	2
		45							67		
		50									
500000	4000	30	8	0,95	2	33	0,83	2	68	0,68	2
		35	9	1,04	2	34	0,96	2	69	0,78	2
		40	10	1,15	2	35	0,98	2	70	0,9	2
		45				36	1,04	2	71	0,95	2
		50				37	1,05	2	72	1	2
	20000	30	11	0,68	2	38	0,44	2	73	0,34	2
		35	12			39	0,51	2	74	0,45	2
		40				40			75	0,68	2
		45							76		
		50									
	40000	30	13	0,45	2	41	<		77	0,32	8
		35	14			42	0,51	5	78	<	
		40				43			79	0,53	5
		45							80		
		50									
900000	4000	30	15	0,99	2	44	0,84	2	81	0,71	2
		35	16	1,05	2	45	0,92	2	82	0,82	2
		40	17	1,46	2	46	0,99	2	83	0,9	2
		45				47	1,24	2	84	1,05	2
		50				48	1,35	2	85	1,08	2
	20000	30	18	0,5	2	49	0,44	2	86	0,37	2
		35	19			50	0,51	5	87	0,45	2
		40				51			88	0,65	2
		45							89		
		50									
	40000	30	20	0,44	5	52	0,38	7	90	0,34	8
		35	21			53	0,48	5	91	<	
		40				54			92	0,48	5
		45							93		
		50									

Tabla 4.95: Valores máximos de coeficiente de descarrilamiento en el transcurso de la curva

RADIO (m)			300			400			500		
SUSPENSION (N/m)	MASA (kg)	VELOCIDAD (m/s)	nº	Coef. Desc.	Rueda	nº	Coef. Desc.	Rueda	nº	Coef. Desc.	Rueda
100000	4000	30	1	0,51	5	22	0,37	5	55	0,35	6
		35	2	0,67	5	23	0,48	5	56	0,43	6
		40	3			24	0,6	5	57	0,49	6
		45				25	0,78	5	58	0,56	5
		50				26			59	0,74	5
	20000	30	4	0,41	5	27	0,33	5	60	0,34	8
		35	5			28	0,41	5	61	0,42	5
		40				29			62	0,47	5
		45							63		
		50									
	40000	30	6	0,39	5	30	0,37	5	64	0,34	7
		35	7			31	0,4	5	65	0,42	5
		40				32			66	0,57	5
		45							67		
		50									
500000	4000	30	8	0,6	5	33	0,47	5	68	0,39	6
		35	9	0,77	5	34	0,64	5	69	0,46	5
		40	10			35	0,74	5	70	0,64	5
		45				36	0,86	5	71	0,73	5
		50				37			72	0,84	5
	20000	30	11	0,42	5	38	0,36	6	73	0,33	8
		35	12			39	0,43	6	74	0,38	6
		40				40			75	1,48	1
		45							76		
		50									
	40000	30	13	0,45	5	41	0,38	7	77	0,31	8
		35	14			42	0,46	5	78	0,42	6
		40				43			79	0,45	5
		45							80		
		50									
900000	4000	30	15	0,65	5	44	0,51	5	81	0,43	6
		35	16	0,82	5	45	0,63	5	82	0,55	6
		40	17			46	0,77	5	83	0,69	5
		45				47	0,95	5	84	0,75	5
		50				48			85	0,87	5
	20000	30	18	0,43	5	49	0,38	5	86	0,36	7
		35	19			50	0,42	5	87	0,41	6
		40				51			88	0,43	5
		45							89		
		50									
	40000	30	20	0,41	5	52	0,35	7	90	0,33	8
		35	21			53	0,45	5	91	0,33	6
		40				54			92	0,46	5
		45							93		
		50									

Tras este estudio, se puede afirmar de manera general que:

- Claramente se deduce que cuando la velocidad se incrementa, el coeficiente de descarrilamiento crece considerablemente.
- El radio es uno de los parámetros mas significativos para la variabilidad del coeficiente de descarrilamiento, cuanto más cerrada es la curva, más aumenta el coeficiente de descarrilamiento.
- La masa es un factor que repercute de manera considerable en el coeficiente de descarrilamiento. Hay que señalar que para radios pequeños y velocidades tan altas como las que se han tratado en los análisis, cuando se aumenta el valor de la masa resultan coeficientes menores de descarrilamiento pero hay una mayor facilidad para que se origine el vuelco del vagón.
- La suspensión influye en menor medida que los demás parámetros en el coeficiente de descarrilamiento. Se aprecia más la variación cuanto menor es el radio y solo para masas pequeñas se va haciendo mayor el coeficiente de descarrilamiento cuanto mayor es la rigidez elástica de los resortes.
- En el trascurso de la curva, las ruedas que poseen mayor coeficiente de descarrilamiento son generalmente la rueda externa delantera del primer bogie (2) y la rueda externa trasera del segundo bogie (5) con los radios 300 m y 400 m, pero conforme aumenta el radio de giro, como en el caso en el que el radio es 500 m, se observa como a bajas velocidades el máximo coeficiente de descarrilamiento se produce en la rueda externa trasera del primer bogie (6).
- Generalmente, al entrar en la curva se suele producir el máximo coeficiente de descarrilamiento en la rueda externa delantera del primer bogie (2).
- Se aprecia como a mayor masa menos diferencia hay entre los coeficiente de descarrilamiento que se producen al entrar en la curva y en el trascurso de ésta.
- Cuando se produce vuelco, las ruedas internas siempre se separan del carril en el mismo orden, siendo la primera rueda la interna delantera del primer bogie (4), luego la interna trasera del segundo bogie (7), luego la interna trasera del primer bogie (8) y finalmente la interna delantera del segundo bogie (3).
- El descarrilamiento del vagón es favorecido cuando la masa de éste es pequeña y siempre se produce de la misma manera. La rueda externa delantera del primer bogie (2) supera un coeficiente de descarrilamiento de 1 y la rueda interna delantera del primer bogie (4) deja de tener de contacto con el carril, por lo que el primer par de ruedas tiende a salirse de la vía, pero no descarrila debido a que el segundo par de ruedas permanece en la vía. Pero seguidamente la rueda externa trasera del primer bogie (6) obtiene un valor de coeficiente de descarrilamiento superior a 1 al mismo tiempo que la rueda interna trasera del primer bogie

(8) deja de tener contacto con el carril, de tal manera que los dos pares de ruedas están exentos de restricciones que les hagan permanecer en la vía produciéndose el descarrilamiento del primer bogie.

### **Estudio de sensibilidad**

A continuación se muestra un estudio de sensibilidad donde se puede ver en que medida afectan los distintos parámetros tratados en el estudio al coeficiente de descarrilamiento tanto como para el caso en el que el vagón entra en la curva (tabla 4.96) como para en el circula a través de ésta (tabla 4.97).

Tabla 4.96: Variación del coeficiente de descarrilamiento en el inicio de la curva

<b>Variación del radio (300 m)</b>	<b>Variación del coeficiente de descarrilamiento</b>
+33%	-18%
+66%	-29%
<b>Variación de la suspensión (500000 N/m)</b>	
-80%	-4%
+80%	+4%
<b>Variación de la masa (40000 Kg)</b>	
-50%	+6%
-90%	+112%
<b>Variación de la velocidad (30 m/s)</b>	
+17%	+15%
+33%	+32%
+50%	+40%
+66%	+47%

Tabla 4.97: Variación del coeficiente de descarrilamiento en el transcurso de la curva

<b>Variación del radio (300 m)</b>	<b>Variación del coeficiente de descarrilamiento</b>
+33%	-15%
+66%	-31%
<b>Variación de la suspensión (500000 N/m)</b>	
-80%	-10%
+80%	+10%
<b>Variación de la masa (40000 Kg)</b>	
-50%	+6%
-90%	+26%
<b>Variación de la velocidad (30 m/s)</b>	
+17%	+18%
+33%	+67%
+50%	+87%
+66%	+115%

### **5.2. Trabajos futuros**

Algunos estudios y trabajos futuros, siendo la mejora del transporte de mercancías como finalidad, que se proponen son:

- La velocidad influye de manera notable en el descarrilamiento pero debería estar más exenta de cambios ya que es un factor que representa beneficios en la industria del ferrocarril en temas de rapidez, logística y de carácter económico. Por lo que sería beneficioso centrarse en el estudio de peraltes en recorridos que favorezcan rapidez del transporte de forma segura.
- Análisis de distintos tipos de perfiles de ruedas asegurando un mejor acople a la vía permitiendo la circulación del vagón a mayores velocidades y en curvas más cerradas.
- Trabajar en el avance de programas informáticos de manera que se puedan simular casos de la manera más parecida a la realidad con el objetivo de ahorrar tiempo y dinero en ensayos reales.
- Trabajos en la implantación de transporte ferroviario mediante trenes Maglev, que al circular mediante levitación magnética no existe contacto entre el tren y el carril y desaparecen problemas de desgaste, fatiga y descarrilamiento pudiendo alcanzar velocidades mucho mayores a las convencionales.

## 6. Referencias

---

1. <http://www.danotario.com/ferrocarril.php> (2011)
- [2] Daniel Álvarez Mántaras; Pablo Luque Rodríguez *Ingeniería e Infraestructura de los Transportes FERROCARRILES*. Universidad de Oviedo. 2003
- [3] D. Casas Gallego. *Estudio mediante software de simulación dinámica del fenómeno RCF en ruedas de trenes en configuración de bogie compartido*. PFC. Director: Julio Álvarez Rodríguez, UC3M, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2008
- [4] Iwnicki. S. *Handbook of railway vehicle dynamics*. Taylor and Francis. 2006.
- [5] Carter. F.W. *On the action of a locomotive driving wheel*. Proc. Royal Soc. Ser. A. Vol. 113. pp. 151-157. 1926.
- [6] Johnson. K.L.: The effect of a tangential force upon the rolling motion of an elastic sphere upon a plane. J. Appl. Mech. Vol. 25. pp 339-246. 1964.
- [7] Johnson. K.L y Vermeulen. P.J. *Contact of non-spherical bodies transmitting tangential forces*. J. Appl. Mech. Sci. Vol. 31. pp 338-340. 1964.
- [8] Haines. J y Ollerton. E. *Contact stress distribution on elliptical contact surfaces subjected to radial and tangential forces*. Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 177. pp 95-144. 1963.
- [9] Halling. J. Microslip between a rolling element and it's track arising from geometric conformity. J. Mech. Eng. Sci. Vol. 6. pp 64-73. 1964.
- [10] Kalker. J.J.: *On the rolling contact for two elastic bodies in the presence of dry friction*. PhD dissertation. Delf University of Technology, Delf. Netherlands. 1967.
- [11] Hertz. H.: *Gesamelte Werke*. Vol. 1. pp 155. Leipzig. 1895
- [12] Kalker. J.J.: *A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact*. Vehicle System Dynamics. Vol. 11. pp 1-13. 1983
- [13] Kalker. J. J.. *Simplified theory of rolling contact*. Delf Progress Report 1 Pp 1-10. 1973
- [14] León Clavijo Guido: *Vías Férreas*. Carrera de Ingeniería Civil, UMSS, ([www.umss.edu.bo/epubs/etexts/downloads/26/4.htm](http://www.umss.edu.bo/epubs/etexts/downloads/26/4.htm)), 2001
- [15] Jean Alias; Antonio Valdés. *La vía del ferrocarril*, Madrid, Bellisco, 1990
- [16] *Laden Wagon with Y25 bogie 22T axle load. A/Rail model*. Abril 2002
- [17]. Bosso. N, Gugliotta. A y Somà. A. *Simulation of a freight bogie with friction dampers*. Adams/Rail Users' Conference. Holanda, 2000



